

LA
MACHINE
A VAPEUR

PARIS



BIBLIOTHÈQUE DES CONNAISSANCES UTILES

AIMÉ WITZ

LA MACHINE A VAPEUR

PARIS
J.-B. BAILLIÈRE ET FILS

La galvanoplastie, par E. Bouant. 1 v. in-16, 34 fig.. 3 fr. 50
La navigation aérienne et les ballons dirigeables, par H. de Graffigny. 1 vol. in-16, avec 43 fig.......... 3 fr. 50

AGRICULTURE

La truffe, par le Dr Ferry de la Bellonne. 1 vol. in-16, avec 20 fig. et une eau-forte............................ 3 fr. 50
Les abeilles, par Maurice Girard. 1 v. in-16, avec 80 fig. 3 fr. 50
L'alcool, au point de vue chimique, agricole et économique, par A. Larbalétrier. 1 vol. in-16, avec 62 figures..... 3 fr. 50
La vigne et le raisin, par le Dr Herpin. 1 vol. in-16. 3 fr. 50

MINÉRALOGIE ET GÉOLOGIE

Les tremblements de terre, par Fouqué, membre de l'Institut. 1 vol. in-16, avec 16 figures................. 3 fr. 50
Les minéraux utiles et l'exploitation des mines, par Louis Knab. 1 vol. in-16, avec 74 figures.......... 3 fr. 50
Les Vosges, le sol et les habitants, par Bleicher. 1 vol. in-16, avec 50 figures................................... 3 fr. 50

PALÉONTOLOGIE

Les ancêtres de nos animaux, par Alb. Gaudry, membre de l'Institut. 1 vol. in-16, avec 49 figures.......... 3 fr. 50
Les plantes fossiles, par B. Renault, aide-naturaliste au Muséum. 1 vol. in-16, avec 52 figures............. 3 fr. 50
Origine paléontologique des arbres cultivés, par G. de Saporta, correspondant de l'Institut. 1 v. in-16, 44 fig. 3 fr. 50

ANTHROPOLOGIE ET ARCHÉOLOGIE

Le préhistorique en Europe, congrès, musée, excursions par G. Cotteau. 1 vol. in-16, avec 150 figures..... 3 fr. 50
Les pygmées, par A. de Quatrefages (de l'Institut), professeur au Muséum. 1 vol. in-16, avec 31 figures.......... 3 fr. 50
Archéologie préhistorique, par le baron J. de Baye. 1 vol. in-16, avec 51 fig.................................. 3 fr. 50
L'homme avant l'histoire, par Ch. Debierre, professeur à la Faculté de Lille. 1 vol. in-16, avec 84 fig......... 3 fr. 50
L'Égypte au temps des Pharaons, la vie, la science et l'art, par V. Loret. 1 vol. in-16 avec figures....... 3 fr. 50

BOTANIQUE

La biologie végétale, par P. Vuillemin, chef des travaux à la Faculté de Nancy. 1 vol. in-16, avec 83 fig......... 3 fr. 50

ZOOLOGIE

La géographie zoologique, par le Dr E.-L. Trouessart. 1 vol. in-16, avec 50 fig................................ 3 fr. 50
Les facultés mentales des animaux, par le Dr Foveau de Courmelles. 1 vol. in-16, avec fig............... 3 fr. 50
La vie au sein des mers, par L. Dollo. 1 v. in-16. 3 fr. 50
Sous les mers. Campagnes d'explorations sous-marines, par le marquis de Folin. 1 vol. in-16, avec 44 fig..... 3 fr. 50

ENVOI FRANCO CONTRE UN MANDAT POSTALE.

L'huître et les mollusques comestibles, par A. NOULD LOCARD. 1 vol. in-16, avec 50 fig.................... 3 fr. 50
Les sociétés chez les animaux, par Paul GIROD. 1 vol. in-16, avec 53 fig............................... 3 fr. 50
Les industries des animaux, par Fréd. HOUSSAY, professeur à l'École normale. 1 vol. in-16, avec 50 fig......... 3 fr. 50
La lutte pour l'existence chez les animaux marins, par Léon FRÉDÉRICQ, de Liège. 1 vol. in-16, avec 50 fig. 3 fr. 50
Le transformisme, par Edmond PÉRIER, professeur au Muséum. 1 vol. in-16, avec 87 fig.................... 3 fr. 50
Les végétaux et les animaux lumineux, par H. GADEAU DE KERVILLE. 1 vol. in-16, avec 50 fig.............. 3 fr. 50
Les sens chez les animaux inférieurs, par E. JOURDAN, de Marseille. 1 vol. in-16, avec 50 fig.............. 3 fr. 50
Les sciences naturelles et les problèmes qu'elles font surgir, par Th. HUXLEY. 1 vol. in-16.................. 3 fr. 50
Les parasites de l'homme, par L.-R. MONIEZ, professeur à la Faculté de Lille. 1 vol. in-16, avec fig......... 3 fr. 50
La vie des oiseaux, scènes d'après nature, par le baron d'HAMONVILLE. 1 vol. in-16, avec 20 pl................ 3 fr. 50

PHYSIOLOGIE

Les poisons de l'air, empoisonnements et asphyxies, par N. GRÉHANT. 1 vol. in-16, avec 21 fig.............. 3 fr. 50
La science expérimentale, par CLAUDE BERNARD, de l'Institut. 1 vol. in-16, avec 19 fig...................... 3 fr. 50
Technique microscopique et histologique, par Mathias DUVAL, prof. à la Faculté de méd. 1 vol. in-16, avec fig. 3 fr. 50
La vie et ses attributs, par E. BOUCHUT. 1 v. in-16 3 fr. 50
L'Évolution du système nerveux, par le Dr H. BEAUNIS. 1 vol. in-16, avec 200 fig........................ 3 fr. 50

PSYCHOLOGIE PHYSIOLOGIQUE

Magnétisme et hypnotisme, par le Dr A. CULLERRE. 1 vol. in-16, avec 28 fig................................ 3 fr. 50
Les émotions chez les hypnotiques, par J. LUYS, de l'Acad. de méd. 1 vol. in-16, avec 28 pl............. 3 fr. 50
Hypnotisme, double conscience et altérations de la personnalité, par le Dr AZAM. 1 vol. in-16, avec fig. 3 fr. 50
Les variations de la personnalité, par les docteurs BOURRU et BUROT. 1 vol. in-16, avec 15 fig................ 3 fr. 50
La suggestion mentale et l'action à distance des substances toxiques et médicamenteuses, par les docteurs BOURRU et BUROT. 1 vol. in-16, avec 10 fig..... 3 fr. 50
Le somnambulisme provoqué, par H. BEAUNIS, professeur à la Faculté de Nancy. 1 vol. in-16, avec fig......... 3 fr. 50
Le cerveau et l'activité cérébrale, par Al. HERZEN, professeur à l'Académie de Lausanne. 1 vol. in-16...... 3 fr. 50
Le monde des rêves, par Max SIMON, 1 vol. in-16. 3 fr. 50
Le génie, la raison, la folie, par L.-F. LELUT, 1 v. in-16 3 fr. 50
Fous et bouffons, par P. MOREAU (de Tours). 1 vol. in-16 3 fr. 50

ENVOI FRANCO CONTRE UN MANDAT POSTAL

BIBLIOTHÈQUE DES CONNAISSANCES UTILES

LA

MACHINE A VAPEUR

LIBRAIRIE J.-B. BAILLIÈRE ET FLIS

BIBLIOTHÈQUE DES CONNAISSANCES UTILES

NOUVELLE COLLECTION

De volumes in-16 comprenant 400 pages, illustrés de figures intercalées dans le texte

à 4 francs le volume cartonné

ARTS ET MÉTIERS

INDUSTRIE MANUFACTURIÈRE, ART DE L'INGÉNIEUR, CHIMIE, ÉLECTRICITÉ

BEAUVISAGE. Les matières grasses. caractères, falsifications et essai des huiles, beurres, graisses, suifs et cires

BREVANS (DE). La fabrication des liqueurs et des conserves.

GRAFFIGNY (H. DE). Les industries d'amateurs, le papier et la toile, — la terre, la cire, le verre et la porcelaine, — le bois, — les métaux.

HERAUD. Les secrets de la science et de l'industrie, recettes, formules et procédés d'une utilité générale et d'une application journalière.

LACROIX-DANLIARD. La plume des oiseaux.

LEFÈVRE (J.). L'électricité à la maison.

LEVERRIER. La Métallurgie.

PIESSE (S.). Histoire des parfums et hygiène de la toilette.

—— Chimie des parfums et fabrication des savons.

RICHE (A.). L'art de l'essayeur.

—— Monnaie, médailles et bijoux, essai et contrôle des ouvrages d'or et d'argent.

SCHŒLLER. Les Chemins de fer.

TASSART. Les matières textiles. les matières colorantes et la teinture.

—— L'industrie de la teinture.

VIGNON (L.). La soie, au point de vue scientifique et industriel.

WITZ (AIMÉ). La machine à vapeur.

ÉCONOMIE RURALE

AGRICULTURE, HORTICULTURE, ÉLEVAGE

BEL (J.). Les maladies de la vigne, et les meilleurs cépages français et américains.

BELLAIR (G.). Les arbres fruitiers.

BOIS (D.). Le petit jardin.

—— Plantes d'appartement et plantes de fenêtres.

BUCHARD. Les machines agricoles.

—— Constructions agricoles et architecture rurale.

FERVILLE. L'industrie laitière, le lait, le beurre et le fromage.

GOBIN (A.). La pisciculture en eaux douces.

—— La pisciculture en eaux salées.

GUYOT. Les animaux de la ferme.

LARBALETRIER Les engrais et leurs applications à la fertilisation du sol.

LOCARD, La pêche et les poissons des eaux douces.

MONTILLOT. L'amateur d'insectes, caractères et mœurs des insectes, chasse, préparation et conservation des collections. Introduction par le professeur LABOULBÈNE, ancien président de la Société entomologique.

—— Les insectes nuisibles

RELIER. Guide pratique de l'élevage du cheval.

ÉCONOMIE DOMESTIQUE

HYGIÈNE ET MÉDECINE USUELLES

DALTON (C.). Physiologie et hygiène des écoles, des collèges et des familles.

DONNÉ. Conseils aux mères sur la manière d'élever les enfants nouveau-nés.

FERRAND (E.) et DELPECH (A.). Premiers secours en cas d'accidents et d'indispositions subites.

HÉRAUD. Les secrets de l'alimentation.

HÉRAUD. Les secrets de l'économie domestique, à la ville et à la campagne, recettes, formules et procédés d'une utilité générale et d'une application journalière.

LEBLOND et BOUVIER. La gymnastique et les excercices physiques.

SAINT-VINCENT (A.-C. DE). Nouvelle médecine des familles, à la ville et à la campagne.

LYON. — IMPRIMERIE PITRAT AINÉ, 4, RUE GENTIL

AIMÉ WITZ
DOCTEUR ÈS SCIENCE
INGÉNIEUR DES ARTS ET MANUFACTURES

LA MACHINE A VAPEUR

Avec Figures intercalées dans le texte

MACHINES TYPES
Watt, Hornsby, Chaligny, Bonjour, Windsor, Satre, Duvergier, Queruel, Buffaud et Robatel, Davey Paxman, Weyher et Richemond, Corliss, Farcot, Dujardin, Sulzer, Cie de Fives Lille, Jean et Peyrusson, Wheelock, Bietrix, etc.
MACHINES A GRANDE VITESSE
(Horizontales et verticales)
MACHINES LOCOMOBILES
MACHINES ROTATIVES ET TURBO-MOTEURS
MACHINES COMPACTES

PARIS
LIBRAIRIE J.-B. BAILLIÈRE ET FILS
19, RUE HAUTEFEUILLE, PRÈS DU BOULEVARD SAINT-GERMAIN

1891

PRÉFACE

En écrivant ce livre, l'auteur s'est proposé d'être clair, méthodique et précis, mais il s'est défendu d'être savant.

Il a condensé, dans un nombre de pages peu considérable, la théorie et la pratique des machines à vapeur, en mettant l'une et l'autre à la portée de tous. Bien des sujets n'ont été qu'effleurés, mais rien d'essentiel n'a été omis.

La partie descriptive a été plus largement développée que le reste; grâce au concours empressé de nos plus grandes maisons de construction, il nous a été possible de placer sous les yeux du lecteur les types de machines les plus célèbres et, par suite, les plus répandus et les meilleurs.

En somme, nous nous sommes imposé de rester très élémentaire, mais nous voudrions avoir réussi à faire un exposé complet de la question.

LILLE, mai 1891.

LA

MACHINE A VAPEUR

INTRODUCTION

L'homme a besoin d'auxiliaires : après avoir asservi les animaux, et quelquefois son semblable, il a découvert le moyen de tirer parti de la pression du vent pour actionner des moulins, puis il a capté des cours d'eau et il a réussi à actualiser l'énergie potentielle des chutes naturelles ; moulins à vent et roues hydrauliques sont de vieux serviteurs de l'humanité. Ce n'est cependant guère qu'au XVIIIe siècle que fut trouvé, inconsciemment, le secret de transformer en travail le calorique dégagé dans les combustions, pour réaliser des machines motrices, qu'on alimente de calories pour en obtenir des kilogrammètres. En réalité, tous ces moteurs, animés ou inanimés, appartiennent à une même famille, puisqu'ils ne sont tous que des transformateurs de l'énergie solaire : l'esclave ou la bête de somme transforment l'énergie du végétal et de l'animal dont ils se nourrissent ; les courants aériens et les rivières qui coulent au fond des vallées doivent leur puissance à l'effet calorifique des rayons du soleil, qui aliment leurs sources ; c'est encore l'énergie solaire qui est mise à notre disposition par le végétal combustible, contemporain ou fossile : bref, toutes les machines

motrices dérivent du Soleil, qui est le grand moteur de notre monde.

Le remarquable progrès réalisé par le XVIII[e] siècle est d'avoir créé une machine motrice d'une puissance relativement illimitée : la machine à vapeur en particulier et les machines thermiques en général peuvent, en effet, être multipliées tant que l'on voudra, leurs dimensions peuvent augmenter et leur activité croître toujours; nos bassins houillers ont des disponibilités suffisantes pour nous dispenser d'envisager pour le moment les conséquences redoutables de leur épuisement. Voilà comment la science a pu décupler les forces de l'homme ; nous verrons même tout à l'heure comment elle a modifié radicalement les conditions du travail en rendant possibles des opérations que l'antiquité n'attribuait même pas à la main puissante des Titans.

C'est inconsciemment, disons-nous, que les ingénieurs ont surpris le secret de la transformation du calorique en travail; ils ignoraient, en effet, les principes de la thermodynamique, ceux qui eurent l'idée de faire bouillir de l'eau en un vase clos et de faire agir la pression de sa vapeur sur un piston mobile relié à une manivelle. Mais il serait injuste de dire qu'ils n'ont pas eu conscience de la portée de leur admirable découverte :

Exegi monumentum ære perennius,
Non omnis moriar !

disait le marquis de Worcester, et ce grand chrétien remerciait Dieu en un admirable langage du don qui venait d'être fait à l'humanité [1]. Cependant il n'avait construit qu'une machine à élever l'eau : elle montait quatre grands seaux d'eau, à quarante pieds, en moins d'une minute. Newcomen fit mieux, car il mit en marche la première machine d'épuisement digne de ce nom ; mais c'est au génie de Watt qu'est

[1] Marquis of Worcester, *Century of Inventions.*

due la machine à vapeur proprement dite, apte à mouvoir toute espèce d'outils, régulièrement et économiquement. Puis vinrent Fulton, qui résolut le problème de la navigation à vapeur, Stephenson et Seguin, les créateurs de la locomotive. Ce n'est pas en quelques lignes qu'on peut résumer l'histoire d'un aussi grand événement scientifique : nous nous contenterons de marquer les étapes successives de la machine à vapeur fixe de l'industrie manufacturière.

La machine de Newcomen développait tout au plus un travail de 8 chevaux et elle consommait 30 kilogrammes de charbon par cheval et par heure; Smeaton porta la puissance de ces machines à 160 chevaux et il abaissa la consommation de houille à 10 kilogrammes par cheval-heure; Watt inventa le double effet, le condenseur, la pompe à air, le régulateur, il fit de la détente et il modifia si bien l'œuvre de ses devanciers que la consommation tomba à 4 kilogrammes : je connais aujourd'hui encore, en 1891, en France, des machines qui ne sont pas plus économiques.

Watt est un des plus beaux génies des temps modernes et l'on doit reconnaître qu'il a créé la machine à vapeur de toutes pièces, car ses prédécesseurs ne lui avaient fourni que des modèles informes, tandis qu'il a légué à notre siècle un admirable chef-d'œuvre, complet dans son idée, parfait dans son concept, dont nous n'avons qu'à modifier les détails. C'est une indication de Watt qui a mit Woolf sur la voie des machines à double détente dans un cylindre d'admission et un second cylindre d'expansion: la consommation fut alors de 2 kilogrammes. C'est encore Watt qui avait recommandé d'entourer les cylindres d'une enveloppe de vapeur, pour lutter contre les condensations internes, si désastreuses au point de vue économique. Hirn a montré que l'on avait eu grand tort de ne pas tenir compte de cette prescription du maître, et, en reprenant cette pratique, il a encore fait réaliser une notable économie.

La variabilité de la détente par l'action d'un régulateur

est un perfectionnement tout moderne, qui est signé des noms de Thomas, Farcot, Cavé, Cail, etc.; grâce à des dispositifs spéciaux du tiroir, le régulateur distribue à chaque coup de piston la quantité de vapeur strictement nécessaire pour maintenir la vitesse de régime de la machine. L'Américain Corliss a été plus ingénieux encore : un déclic produit des ouvertures instantanées des orifices du cylindre ; de plus, ces orifices sont multipliés et disposés à l'avant et à l'arrière, au haut et au bas du cylindre. Le succès de Corliss avait été trop grand pour qu'on ne l'imitât pas : les brevets se sont succédé rapidement, depuis 1867, et il est résulté de cette fièvre d'innovation une notable et sérieuse amélioration de la machine à vapeur. Enfin, les travaux de Benjamin Normant, de John Elder et de Dupuy de Lôme, ont vulgarisé les dispositifs *compound*, dans lesquels on emploie deux, trois et même quatre cylindres en cascade, pour pratiquer une expansion multiple qui permet de détendre la vapeur complètement et dans les meilleures conditions. L'école de Hirn, à laquelle nous sommes fier d'appartenir, a donné la première une théorie satisfaisante des phénomènes qui se produisent dans ces machines.

Aujourd'hui, on construit des machines fixes de 1000 chevaux; à Providence, en Amérique, on a même abordé des puissances de 3000 chevaux; dans la marine, les cuirassés portent des machines de 20.000 chevaux. Il y a soixante ans, le poids moyen des machines à vapeur était de 1200 kilogrammes par cheval; en 1850, ce poids n'était plus que de 700 kilogrammes ; en ce moment, on construit des machines pesant moins de 100 kilogrammes par cheval. Le prix des machines a suivi la même progression décroissante : pour 75 chevaux, on payait 70.000 francs en 1860, machine, chaudière, tuyaux, accessoires et tous frais compris; on dépense moitié moins en 1890.

Mais c'est dans la consommation de charbon que se révèle surtout le progrès accompli par la machine à vapeur ; au

cours d'une étude théorique et expérimentale que nous venons de publier sur les machines à détente successive, nous avons signalé une machine de la maison Sulzer de Winterthur, d'une puissance de 330 chevaux, dépensant environ 750 grammes de charbon par cheval et par heure ; c'est un résultat extraordinaire, nous le reconnaissons et le déclarons, mais il marque bien la nature et l'étendue des progrès réalisés.

Ainsi donc, avec 750 grammes de charbon, on suffit au travail d'un cheval-vapeur ; il s'agit ici du cheval de Watt, c'est-à-dire du cheval de 75 kilogrammètres par seconde, adopté par lui comme unité de puissance. Ce cheval fictif équivaut à 3 chevaux en chair et en os et un de ces chevaux produit le travail de 7 hommes. Nous reviendrons sur cette comparaison du travail mécanique avec celui des moteurs animés.

Après avoir exposé les progrès des machines fixes, il nous sera aisé de retracer en quelques mots les améliorations des machines de traction. Les locomotives ont un double objet à réaliser, la vitesse et la puissance. Au début de l'industrie des chemins de fers, vers 1845, on se contentait de vitesses de 50 kilomètres à l'heure pour de légers express et les trains les plus lourds, qui pesaient 300 à 400 tonnes, circulaient avec des vitesses de 15 à 18 kilomètres. Le type par excellence de la machine d'express était alors le modèle Crampton, caractérisé par le diamètre considérable de ses roues motrices et par l'abaissement extrême de son centre de gravité : c'était le cheval de course des voies ferrées ; il remorquait des trains de 12 voitures, pesant de 100 à 120 tonnes. La locomotive Engerth, montée sur quatre paires de petites roues, était le mammouth des trains de marchandises ; il lui fallait des chaudières à grande surface de chauffe et des cylindres à longue course : on pouvait lui faire traîner ses 40 wagons de 10 tonnes, sur des rampes de 4 millimètres par mètre. Mais les conditions nouvelles du trafic imposé aux Com

pagnies ont obligé les ingénieurs à des tranformations complètes du matériel : la charge des trains express a notablement augmenté en même temps que leur vitesse croissait toujours, et la remarquable Crampton s'est trouvée impuissante à effectuer des labeurs pour lesquels elle n'était pas faite ; le service des houillères a amené d'autre part la formation de trains de 600 tonnes et plus, qu'il a fallu démarrer facilement, remorquer sur de fortes rampes de 8 millimètres et animer d'une vitesse moyenne de 25 à 30 kilomètres. Toutes les difficultés ont été surmontées. En ce moment, les trains rapides de 200 tonnes ont des vitesses de 75 kilomètres et les trains de marchandises font sans peine 25 kilomètres avec une charge qui atteint quelquefois 650 tonnes : la puissance des nouvelles machines dépasse 350 chevaux.

Le public croit à tort que les Compagnies de chemins de fer ne se préoccupent pas de la consommation de charbon ; d'autre part, on considère les locomotives comme des moteurs défectueux à ce point de vue ; c'est une double erreur. Les machines Crampton consommaient environ 8 kilogrammes de charbon par kilomètre, pour une remorque de douze voitures : c'était un résultat excellent, mais dont on ne pouvait se contenter. La Compagnie du Nord compte aujourd'hui sur une dépense de 29 kilogrammes, par kilomètre pour une locomotive à huit roues couplées, système Woolf, la charge du train étant de 605 tonnes. Veuillez remarquer ce résultat : pour le prix de trente et un centimes on transporte donc un train de 605 tonnes à un kilomètre de distance !

Les machines à vapeur marines ne le cèdent en rien aux précédentes : qu'on en juge par ce rapprochement. On lisait dans l'*Evening-Post* de New-York, le 2 octobre 1807, la courte annonce que voici : « Le steamboat nouvellement inventé par M. Fulton, très convenablement approprié pour les voyageurs, et destiné à faire le service de paquebot entre Albany et New-York, est parti ce matin avec quatre-vingt-dix passagers, malgré un fort vent de bout ; néanmoins on a

estimé qu'il se mouvait sur l'eau avec une vitesse de six milles à l'heure. » Ce petit vapeur s'appelait le *Clermont ;* sa vitesse atteignait onze kilomètres à l'heure.

Douze ans plus tard, le 26 mai 1819, le *Savannah*, jaugeant 350 tonneaux, partait d'Amérique et il abordait à Liverpool le 22 juin, après vingt-sept jours de traversée. Ce ne fut néanmoins guère qu'en 1838 que la navigation transocéanique fut définitivement organisée : on mettait alors dix-huit jours pour aller de Bristol à New-York ; en 1843, on signale une traversée de douze jours ; aujourd'hui les voyages de huit jours sont fréquents, mais il s'en fait de plus rapides. Ainsi, on nous annonçait récemment que l'*Umbria* avait franchi les 2800 milles qui séparent New-York de Queenstown en six jours deux heures trente-sept minutes, ce qui correspond à une vitesse de dix-neuf nœuds, soit de trente-cinq kilomètres à l'heure. La machine du *Clermont* était de vingt chevaux, la puissance des machines de l'*Umbria* est de quatre mille chevaux. Qu'on juge par cette comparaison des pas de géants faits par le génie maritime dans la voie ouverte par Fulton.

Or, nous aurions pu citer le grand paquebot de la Compagnie Innmann, le *City of New-York*, portant deux mille passagers, auquel des machines de onze mille chevaux assurent une vitesse de vingt nœuds. On projette un autre vapeur de vingt et un mille chevaux, le *Pacahontas*, qui devra faire le voyage d'Amérique en quatre jours environ.

Cette augmentation de vitesse, relativement légère, exige une puissance de machinerie double, parce que le travail croît avec le cube de la vitesse. Nous voyons donc qu'en quatre-vingts ans la mécanique et la construction navale ont progressé étonnamment, et la portée de ce fait est grande, s'il faut en croire Macaulay, car il déclare que les inventions qui ont pour résultat d'abréger les distances sont celles qui contribuent le plus à la civilisation et au bonheur de l'espèce humaine : l'historien anglais exagère sans doute, mais son

opinion n'est pas aussi paradoxale qu'elle le paraît de prime abord.

Ceci nous amène à considérer le rôle de la machine à vapeur dans notre civilisation intensive : un peu de statistique devient nécessaire à notre étude. La statistique est intéressante quand on n'en abuse pas.

Le Rapport de la Commission de l'Industrie minérale et des Machines à vapeur nous apprend qu'en France il y avait, dès 1886, 42.600 établissements pourvus de machines à vapeur ; il convient d'y ajouter 9114 locomotives et 700 navires à vapeur. La puissance totale de ces appareils dépasse 3 millions de chevaux de 75 kilogrammètres. Les ressources des pays voisins sont plus grandes encore : l'Angleterre dispose de 7 millions, l'Allemagne de 4 millions et demi, l'Autriche de 1 million, et la petite, mais industrieuse Belgique, d'un million aussi ; enfin les Etats-Unis de l'Amérique ont 8 millions de chevaux. Ces chiffres, vrais en 1886, sont trop faibles en 1891 ; on peut estimer au bas mot à 46 millions de chevaux l'énergie mise à la disposition de l'homme par les machines à vapeur. Or ces 46 millions de chevaux remplacent 1 milliard d'hommes de peine, soit le double de la population laborieuse de la terre, estimée à 1.455.923.000 individus : la machine à vapeur a donc triplé la puissance de travail mécanique de l'humanité, Ce résultat mérite d'arrêter l'attention des philosophes et des penseurs.

Voilà en effet que des millions de bras sont déchargés d'une accablante besogne et remplacés par les bras de fer de l'outil ; des millions d'êtres humains sont libérés du pénible labeur de la roue, de la chaîne, de la rame, du treuil et du cabestan; ces pauvres esclaves, condamnés autrefois au rôle de machines animales, sont émancipés par la machine à vapeur et élevés à la dignité de travailleurs intelligents. Certes, nous ne nous faisons pas d'illusion, et nous n'oublions pas que la race d'Adam devra toujours gagner son pain à la sueur de

son front; nous savons que le fardeau du travail pèsera lourdement sur nos épaules. Mais il faut reconnaître néanmoins que le perfectionnement des machines a entraîné par voie de conséquence un réel progrès dans la condition matérielle de l'ouvrier, et ce dernier doit bénir la Providence de ce que, désormais, moins astreint au travail musculaire, il ait maintenant le loisir de lever son front vers le Ciel et de s'occuper davantage de la culture de son esprit et surtout des intérêts de son âme.

Mais ce n'est pas seulement la puissance mécanique de l'humanité qui a été triplée, c'est son activité qui a été décuplée. Voyez ce train de marchandises, composé de 45 wagons, pesant plus de 600 tonnes, faisant 25 kilomètres à l'heure sous la remorque d'une puissante locomotive de 330 chevaux. Sans la vapeur, il eût été impossible d'effectuer ce travail, car il aurait fallu atteler 1000 chevaux en tête du train. En admettant qu'on trouvât ces chevaux en nombre suffisant, on ne pourrait du moins les nourrir, ni les relayer; de plus, on serait bien embarrassé de les atteler, de les conduire et de les diriger; enfin on obtiendrait au plus une vitesse de 6 kilomètres. Voyez encore ce train-éclair, qui vole sur les rails et dévore l'espace, franchissant en trois heures quarante-cinq minutes les 260 kilomètres compris entre Paris et Lille. Les Américains disent avec raison que « le temps est l'étoffe de la vie »; en permettant ces déplacements rapides, la vapeur conduit à une utilisation plus complète des quelques jours dont se compose notre existence et la vie humaine se trouve par le fait même allongée, « Remplissez la terre et assujettissez-là, » a-t-il été dit à l'homme; si la première partie du précepte divin est malheureusement oubliée par quelques nations, il faut reconnaître du moins que jamais la seconde n'a été mieux accomplie qu'aujourd'hui. C'est le résultat des efforts des savants et des ingénieurs, chercheurs patients et infatigables, créateurs de la thermodynamiqne et de son chef-d'œuvre, la machine

à vapeur ; ils se nomment Papin, Worcester, Watt, Seguin, Stephenson, Mayer, Carnot, Joule, Clausius, Hirn, etc. Les noms de ces hommes sont inscrits au livre d'or de l'industrie et des sciences appliquées ; c'est leur travail qui a produit les merveilles dont notre siècle se glorifie à juste titre dans l'ordre matériel.

CHAPITRE PREMIER

THÉORIE GÉNÉRIQUE DE LA MACHINE A VAPEUR

I. **Les deux principes de la thermodynamique.** — En chauffant un corps, on le dilate et il se produit ainsi un certain travail, qui peut être recueilli et utilisé : c'est le prix de la chaleur dépensée.

En comprimant un corps, on l'échauffe, mais il faut dépenser à cet effet du travail ; la chaleur produite est le prix du travail absorbé par la compression.

Ces deux phénomènes réciproques ont montré qu'il y a une corrélation intime entre la chaleur et le travail ; la chaleur se transforme en travail et le travail se transforme en chaleur. C'est la loi d'équivalence formulée par Mayer : elle constitue le *premier principe* de la thermodynamique et s'énonce ainsi qu'il suit :

Toutes les fois qu'un corps produit ou subit un travail, il disparaît de la chaleur ou bien il en apparaît ; et il existe un rapport unique et constant entre les quantités de travail et de chaleur qui dépendent les unes des autres dans ces phénomènes.

Ce rapport unique et constant a été déterminé par l'expérience : sa valeur dépend des unités de chaleur et de travail adoptées. Si l'on choisit la calorie et le kilogrammètre, il est égal à 425 et l'on dira, par exemple, que le travail de

425 kilogrammètres correspond à la quantité de chaleur nécessaire pour élever d'un degré centigrade la température d'un kilogramme d'eau.

Il n'y a évidemment aucun intérêt industriel à dépenser du travail pour produire de la chaleur ; mais l'opération qui consiste à faire des kilogrammètres en brûlant du charbon est au contraire éminemment pratique.

Cette transformation est opérée dans les machines à feu : on y brûle un combustible ; la chaleur dégagée dans le foyer, vaporise de l'eau, dilate sa vapeur et lui fait acquérir une tension déterminée, laquelle s'exerce sur le piston mobile d'un cylindre et le pousse en avant. Soit P la pression moyenne effectuée de ce fluide par centimètre carré en kilogrammes ; désignons par S la surface du piston en centimètres carrés et par C sa course, c'est-à-dire le chemin parcouru par lui sous l'impulsion du fluide ; le travail effectué par coup de piston est égal à P S C. Nous l'écrirons $\mathfrak{T}$.

La vapeur pousse donc le piston en avant ; mais pour produire un mouvement continu, il faut que ce piston, qui est rattaché à une manivelle par sa bielle, revienne en arrière après avoir achevé sa course. A la *course-avant* succède donc nécessairement une *course-arrière* : ce résultat s'obtient en annulant la pression de la vapeur sur une face du piston et en faisant agir au contraire la vapeur sur l'autre face. On annule la pression de la vapeur en la refroidissant, car un abaissement de température la condense ; mais ce refroidissement correspond à une soustraction de calorique.

Voici donc ce qu'il y a à faire pour produire un tour de manivelle ; il faut alternativement vaporiser de l'eau dans un *foyer* et la condenser dans un *condenseur* ou *réfrigérant ;* il faut donner de la chaleur et en reprendre. Supposons que le foyer ait formé Q calories et que le réfrigérant en reprenne q : une quantité $Q - q$ aura disparu dans l'opération et nous savons, en vertu du premier principe, que

l'équivalent de ce calorique est précisément le travail $\mathcal{T}$. Nous aurons donc l'équation :

$$(Q-q)\,425 = \mathcal{T}.$$

Q est la chaleur disponible, q la chaleur reprise, $Q - q$ la chaleur utilisée.

Cette relation est extrêmement remarquable ; mais la thermodynamique va plus loin, car elle nous fait connaitre une seconde loi, qui régit l'ensemble de ces opérations mécaniques et de ces échanges de chaleur. Carnot a en effet découvert par une admirable intuition que le rapport des quantités Q et q, cédées et reprises, dépend uniquement des températures T et t du foyer et du réfrigérant, quand ils fonctionnent à température constante. Ainsi, imaginons que le foyer alimente le cylindre en vapeur dont la température T reste constante pendant toute la durée de l'admission et que le réfrigérant condense cette vapeur à une température constante t, pendant la période de recul du piston : nous savons que les quantités Q et q sont entre elles dans le rappart de T et t, ce qui se représente par l'équation :

$$\frac{Q}{q} = \frac{T}{t}$$

C'est le second principe de thermodynamique, le principe de Carnot ; à notre avis, c'est un principe expérimental, mais dont la vérité ne peut être démontrée que *a posteriori*.

Toutefois il fait noter que les températures T et t ne doivent pas être comptées sur l'échelle centigrade, à partir du zéro de la glace fondante, mais à partir de -273°, zéro absolu auquel on a été conduit par des vues théoriques, qu'il ne convient pas d'exposer ici : par exemple, si la chaudière fournit de la vapeur à 150° et si le condenseur la condense à 45°, nous aurons :

$$T = 150 + 273 = 423^{\circ} \text{ et } t = 45 + 273 = 318^{\circ}$$

Toute la théorie de la machine à vapeur repose sur les deux principes que nous venons de formuler et sur les considérations qui en découlent.

II. **Du cycle de Carnot et de son rendement**. — Par le fonctionnement alternatif du foyer et du condenseur nous obtenons le mouvement d'arrière à l'avant et d'avant à l'arrière du piston; le piston revient donc périodiquement à sa position initiale en même temps que la vapeur repasse périodiquement aussi par son état initial. Il en résulte que la série des transformations subies par la vapeur constitue un cercle fermé, dont toutes les phases se reproduisent à chaque tour de manivelle. On dit que la vapeur parcourt un *cycle.* Inutile de faire observer que ce cycle est fermé, puisque la vapeur retrouve son état initial à chaque révolution.

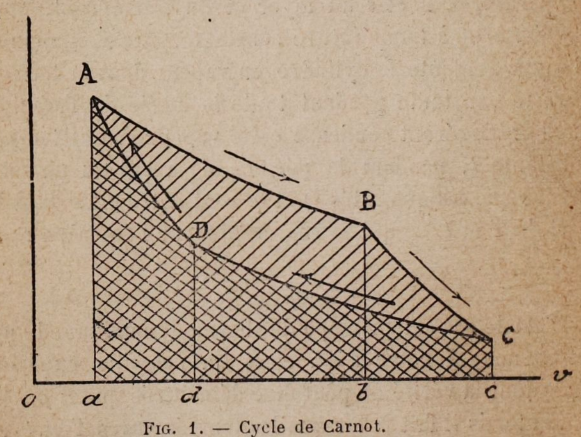


Fig. 1. — Cycle de Carnot.

Un cycle peut être représenté graphiquement : en effet, constatons d'abord qu'on peut représenter ainsi l'état physique de la vapeur. De quoi dépend cet état? De deux choses, de sa pression et de son volume ; ces deux éléments déterminent sa température. Or, prenons deux axes rectangulaires *ov* et *op ;* comptons sur le premier une longueur *oa* égale au volume V de la vapeur; puis, élevons l'ordonnée *a*A, la longueur *a*A étant égale à la pression P de la vapeur. Le point A répond à un état déterminé de la vapeur; c'est

le point figuratif de son état. Que la vapeur augmente de volume en diminuant de pression, le point figuratif prendra les diverses positions comprises entre A et B ; la transformation continuant, le point suivra le chemin BCD et il aboutira à A si le cycle se ferme. La courbe ABCDA est le diagramme du cycle.

Ce mode de représentation est extrêmement utile parce qu'il peint aux yeux la série des transformations qui constituent le cycle ; il a plus de l'avantage de permettre l'évaluation du travail extérieur produit. En effet, nous l'avons vu, le travail effectué sur le piston est P S C; or, S C, le produit de la surface par la course, est égal au volume de la cylindrée ; donc le travail $\mathcal{T}$ est égal à P V. La surface A B *b a* A est précisément égale au produit des pressions successives de la vapeur par ses volumes respectifs; cette aire est donc égale au travail développé par la vapeur dans le passage de l'état A à l'état B ; de même A B C *c a* A est le travail de la détente A B C ; enfin, nous dirons de même que la surface A B C *c a* A est le travail de la seconde phase du cycle. En somme, le second travail venant en décompte du premier, nous voyons que l'aire A B C D représente le travail net du cycle. Les hachures faites sur la figure faciliteront l'intelligence de l'explication qui précède, pour ceux qui ne sont pas encore initiés à ce mode de représentation et de calcul ; tous les ingénieurs sont familiarisés avec ce procédé, qui est dû à Clapeyron.

Le travail $\mathcal{T}$, équivalant à l'aire A B C D A , correspond à la dépense de travail $Q - q$; les hachures penchées à droite montrent le travail équivalent à Q, les hachures penchées à gauche donnent le travail équivalent à la reprise q. Il serait à désirer que Q fût aussi grand que possible et q aussi petit que possible ; la machine serait parfaite si q était égal à zéro. Mais cela est absolument impossible, nous l'avons démontré implicitement ci-dessus : car, nous avons dit que, pour obtenir du travail, il ne faut pas seulement

disposer d'un *foyer*, mais que la périodicité du mouvement et la continuité du travail ne peuvent être réalisées qu'à l'aide du *réfrigérant*, permettant en quelque sorte de faire tomber du calorique du niveau de la source supérieure au niveau de la source inférieure. Une quantité de chaleur Q étant empruntée au foyer, il faut donc rendre nécessairement q au réfrigérant et la différence seule est utilisable.

Longtemps on se figura que le sacrifice de q pouvait être évité, et l'on cherchait un moteur qui transformât en travail tout le calorique disponible au foyer : autant valait chercher la pierre philosophale. Il est aussi impossible de transformer en travail *toute* la chaleur du charbon brûlé qu'il est d'actualiser toute l'énergie potentielle d'une chute d'eau, en comptant comme hauteur de chute la distance du bief d'amont au centre de la terre, vers lequel la gravitation tend à attirer sa masse. Que faudrait-il, en effet, pour utiliser tout le calorique Q ? Il faudrait pouvoir faire q égal à zéro, ce qui revient à dire que t devrait être abaissé au zéro absolu, c'est-à-dire à — 273° ; or, refroidir un corps au zéro absolu n'est pas plus facile que d'atteindre le centre du globe.

Un exemple concret fera mieux saisir notre pensée : 1 kilogramme de charbon dégage en brûlant environ 8500 calories; c'est l'équivalent de $8500 \times 425 = 3.612.500$ kilogrammètres. Et bien, *jamais* aucune machine ne donnera ce résultat. Une machine à vapeur donnera généralement, par kilogramme de houille, un cheval-heure, c'est-à-dire $75 \times 60 \times 60 = 270.000$ kilogrammètres [1]. C'est un rendement *brut* de 7 pour 100.

La perte de q est donc un fait naturel et nécessaire. Le véritable et seul perfectionnement à chercher est de rendre q aussi petit que possible, de manière à ce que $Q - q$ devienne

[1] Nos lecteurs savent que le travail d'un cheval est égal à 75 kilogrammètres par seconde, soit par heure $60 \times 60 \times 75$, comme il est dit dans le texte.

maximum relativement à ce calorique disponible Q. C'est en effet le rapport $\frac{Q-q}{Q}$ qui définit la perfection plus ou moins grande d'une machine à feu : Verdet a appelé ce rapport le *coefficient économique* de la machine. Nous l'écrirons ρ et nous poserons :

$$\rho = \frac{Q-q}{Q}.$$

Il est du plus grand intérêt de savoir déterminer la valeur exacte de ρ : mais nous devons établir d'abord quelle est la valeur maximum que ρ puisse atteindre, car elle dépend de la forme du cycle.

Carnot a décrit un cycle avantageux entre tous, qui porte son nom, c'est le cycle pour lequel on a la relation fondamentale du second principe, $\frac{Q}{q} = \frac{T}{t}$. Il est caractérisé par ce fait que la chaleur du foyer est cédée au fluide à température constante, et que la chaleur est reprise à ce fluide par le réfrigérant à température constante ; on énonce ce fait en disant que les échanges se font suivant des *isothermiques :* ainsi, dans la figure 1, A B et C D seraient des isothermiques. Quant aux phénomènes de détente B C et de compression D A, ils auraient lieu sans perte ni gain de chaleur, c'est-à-dire sans intervention d'aucune source de chaleur et sans influence des parois. Le rendement de ce cycle est maximum, parce que toute la chaleur cédée est employée uniquement à engendrer du travail, sans donner lieu à aucune variation de température, et que toute la chaleur envoyée au réfrigérant est employée de même, donc le plus économiquement possible. C'est, il est vrai, un cycle fictif, qu'on ne saurait réaliser rigoureusement, pour la bonne raison que les parois interviennent fatalement dans les détentes et les compressions. Mais c'est un cycle type, un idéal, qui nous sert de base de comparaison, et duquel on cherche à se rapprocher le plus qu'on peut.

Quel est le rendement de ce cycle idéal ?

Il est facile à déduire du second principe.

Nous aurons, en effet :

$$\rho = \frac{Q - q}{Q} = \frac{T - t}{T} = 1 - \frac{t}{T}.$$

Faisons une application numérique ; dans le cas de la machine à vapeur citée plus haut, nous aurions, si le cycle de Carnot était réalisé :

$$\rho = \frac{423 - 318}{423} = 0{,}248.$$

Cela veut dire, en langage vulgaire, qu'un kilogramme de charbon ne pourra jamais produire 3.612.500 kilogrammètres de la théorie, mais qu'on ne pourra en tirer que les 248 millièmes, soit 895.776 kilogrammètres.

Cette conclusion est importante, nous y reviendrons.

III. **Étude des vapeurs saturées.** — On appelle *vapeur* le fluide qu'on obtient en chauffant un liquide et qui redevient liquide quand on le refroidit. Cette vapeur peut être conservée au contact de son liquide générateur : dans ce cas, elle est dite *saturée;* si on l'en sépare, elle prend le nom de vapeur *surchauffée.*

Dans le premier cas, le moindre refroidissement donne lieu à une condensation ; une compression produit le même résultat. Les vapeurs surchauffées, au contraire, peuvent subir un refroidissement ou une compression sans se liquéfier.

Les vapeurs surchauffées sont comparables aux gaz ; elles suivent la loi de Mariotte, ce qui signifie que, à température constante, les volumes d'une masse de vapeur déterminée sont en raison inverse des pressions qu'elles supportent. En d'autres termes, si nous appelons p leur pression et v leur volume, nous aurons toujours $p\,v =$ constante.

Les lois des vapeurs saturées sont tout autres : leur pression est indépendante de leur volume et elle ne dépend que de leur température. La relation qui lie les pressions aux

températures est extrêmement complexe : elle est donnée par la formule :

$$\text{Log}\, p = a \times b\, \alpha^t \times c\, \beta^t.$$

Une semblable formule ne se prête nullement aux applications industrielles ; aussi a-t-on dressé des tables qui donnent les pressions des vapeurs à toute température. L'utilité de ces tables est si grande, que nous croyons nécessaire d'en donner un extrait, d'après les travaux de Regnault, de Magnus et de Zeuner : nous nous bornerons aux indications qu'il est indispensable de connaître pour la vapeur d'eau.

VAPEUR D'EAU SATURÉE

TEMPÉRATURES		PRESSIONS		POIDS
en degrés centigrades	en degrés absolus	en kilog par centim. carrés	en atmosphères	du mètre cube en kilog.
0°	273°	0,0062	0,006	»
30	303	0,042	0,041	»
40	313	0,074	0,072	»
46,2	319,2	0,1033	0,100	0,0687
60,4	333,4	0,2066	0,200	0,1326
81,7	354,7	0,5167	0,500	0,3153
100	373	1,033	1	0,6059
120,6	393.6	2,066	2	1,1631
127,8	400,8	2,583	2,5	1,4345
133,9	406,9	3,100	3	1,7024
139,2	412,2	3,617	3,5	1,9676
144	417	4,134	4	2,2303
148,3	421,3	4,650	4,5	2,4911
152,3	425,2	5,167	5	2,7500
155,8	428,8	5,684	5,5	3,0073
159,2	432,2	6,200	6	3,2632
162,4	435,4	6,717	6,5	3,5178
165,3	438,3	7,234	7	3,7711
170,8	443,8	8,267	8	4,2745
175,8	448,8	9,301	9	4,7741
180,3	453,3	10,334	10	5,2704
188,4	461,4	12,401	12	6,2543
195,5	468,5	14,468	14	7,2283

La chaleur de formation de la vapeur d'eau saturée est une autre donnée de la physique dont l'importance est grande dans la théorie de la machine à vapeur : c'est aux travaux de Regnault qu'est due la solution de ce problème. Voici la question posée aux physiciens : quelle est la quantité de chaleur nécessaire pour transformer un kilogramme d'eau, pris à une température déterminée, en vapeur saturée à une température et à une pression donnée. En d'autres termes au point de vue pratique, on demande combien le foyer doit fournir de calories par kilogramme d'eau, si l'on alimente la chaudière par de l'eau à 20°, alors que la pression de la vapeur dans la chaudière est de 5 atmosphères et sa température à 152°,25 ?

La question ainsi posée n'admet pas de solution rigoureuse, car la quantité de chaleur nécessaire pour opérer ce changement d'état dépend de la manière dont il s'effectue ; mais Regnault a déterminé expérimentalement cette quantité de chaleur dans le cas particulier où la transformation a lieu à pression constante : c'est le cas pratique, le seul que nous examinerons ici.

Regnault a trouvé que la quantité de chaleur totale L nécessaire pour transformer un kilogramme d'eau prise à 0° en vapeur à t° peut être donné correctement par l'équation.

$$1 = 606{,}5 + 0{,}305\ t$$

Si l'eau était prise à une température t_1, la quantité de chaleur à fournir serait[1]

$$L_1 = 606{,}5 + 0{,}305\,t - t_1.$$

L'emploi du sulfure de carbone, de la benzine et de l'éther dans certaines machines nous impose de signaler les formules analogues établies par le même savant pour ces divers liquides.

[1] Nous négligeons un terme de correction dont la valeur est très faible.

Sulfure de carbone. — $L = 90 + 0,146\,t - 0,0004\,t^2$.

Benzine. — $L = 109 + 0,244\,t - 0,00013\,t^2$.

Ether. — $L = 94 + 0,450\,t - 0,00055\,t^2$.

La chaleur dite *latente* de vaporisation de l'eau représentée par le symbole λ, est donnée par la formule

$$\lambda = 606,5 - 0,695\,t,$$

qui montre que cette quantité décroît avec la température : à 100°, on a $\lambda = 537$ calories, tandis qu'à 152° on n'a plus que 501 calories.

En résumé, la physique nous fournit des tables de tensions des vapeurs saturées, leurs chaleurs totales et leurs chaleurs de vaporisation : ces éléments sont d'une importance capitale dans la théorie de la machine à vapeur.

Mais la vapeur envoyée par les chaudières au cylindre des machines est rarement sèche, car, à la faveur des mouvements causés à la surface de l'eau par l'ébullition et par les sorties de vapeur, une certaine quantité de ce liquide est entraînée dans le courant. Ce liquide s'y trouve à un état particulier, car il a la ténuité d'un fluide, et il est invisible ; on dit qu'il affecte l'état vésiculaire. L'expérience a montré que la proportion d'eau entraînée ainsi peut s'élever à 40 pour 100 du poids de la vapeur et nous sommes convaincus qu'elle ne tombe jamais au-dessous de 3 pour 100. La chaleur totale d'une vapeur humide est bien moindre que celle d'une vapeur sèche, car elle ne renferme pas la chaleur de vaporisation λ de l'eau restée liquide. Ainsi, soit une vapeur à 100°, renfermant 10 pour 100 d'eau de *primage :* sa chaleur totale sera égale à $(606,5 + 30,5)\,0,90 + 100 \times 0,10 = 583$ calories par kilogramme au lieu de 637 calories. Il n'est donc pas étonnant que la consommation d'une machine augmente quand la vapeur n'est pas sèche. Nous verrons du reste tout à l'heure que les entraînements d'eau exercent une influence capitale sur les phénomènes qui s'accomplissent dans le cylindre de la machine.

Arrivons à l'étude de la détente de la vapeur d'eau.

Puisque la vapeur n'est jamais rigoureusement sèche, nous devons reconnaître qu'elle est toujours à l'état de saturation dans le cylindre. Cela étant admis, il est évident que ce n'est pas la loi de Mariotte qui nous donnera la loi de la détente, attendu que la loi de Mariotte ne s'applique qu'aux gaz et aux vapeurs surchauffées. Quelle est donc la règle qui préside aux changements de volume d'une vapeur saturée et comment pourrons nous évaluer à tout instant le pression du mélange d'eau et de vapeur en fonction de son volume? La question est délicate; une partie de l'eau peut se vaporiser ou bien une partie de la vapeur peut se condenser; quel est le phénomène qui se produit ou bien lequel des deux l'emporte sur l'autre? Pour l'étude de la machine à vapeur, ce problème est le plus grave et le plus considérable par ses conséquences : il a été étudié par Clausius, Rankine et Hirn.

L'expérience est d'accord avec la théorie pour nous apprendre que le résultat de la détente est de condenser une partie de la vapeur d'eau[1]; Clausius l'a découvert par le calcul, et Hirn a montré aux yeux le curieux phénomène : un cylindre à glaces parallèles, renfermant de la vapeur d'eau sèche et parfaitement transparente, se remplit de brouillard et d'une épaisse buée dès que l'on opère la détente en laissant la vapeur s'échapper dans l'atmosphère. Le fait est donc incontestable : en même temps que le piston avance dans le cylindre, en détendant la vapeur, il se précipite au sein de la masse et sur les parois une certaine quantité de vapeur condensée.

Mais cette condensation subsiste-t-elle encore dans une vapeur humide? *A priori*, on peut affirmer que la présence

[1] Le phénomène serait inverse pour la vapeur d'éther; ce n'est donc pas une propriété générale des vapeurs saturées que nous énonçons dans le texte, mais une propriété particulière de la vapeur d'eau.

de l'eau liquide doit modifier le phénomène; en effet, l'eau mêlée à la vapeur a la même température qu'elle; si la vapeur est à 5 atmosphères l'eau est donc à 152° ; par suite, aussitôt que la détente fera baisser la pression, l'eau devra se vaporiser. Voici donc que la détente fait condenser la vapeur et évaporer l'eau; il ne reste plus qu'à savoir laquelle des deux actions est la plus considérable. Or, le calcul montre que, à 5 atmosphères, il faudrait une proportion de 46 pour 100 d'eau pour que la vaporisation de l'eau dépassât la condensation de la vapeur: comme cette proportion n'est jamais atteinte, nous sommes autorisés à affirmer que toujours la détente produit une condensation de vapeur dans le cylindre.

Une compression produirait l'inverse, c'est-à-dire une *surchauffe relative :* l'équivalent en calorique du travail dépensé dans la compression est utilisé à vaporiser une partie du liquide mélangé à la vapeur. Hâtons-nous de dire toutefois que l'on dépasserait nos conclusions en afffrmant qu'une compression produit une surchauffe totale ; elle n'est que relative et le résultat final d'une compression de vapeur saturée est toujours une liquéfaction.

Les considérations, les calculs et les expériences que nous venons de rappeler nous conduisent à une conséquence d'une importance capitale dans la théorie des machines à vapeur : elles nous permettent d'établir la loi de la détente des vapeurs saturées, mélangées d'une certaine quantité de liquide entraîné, quand cette détente s'opère dans un cylindre à parois chaudes. La formule qui, donne les pressions en fonction des volumes, indépendamment de l'action des parois, a été établie par Rankine, Grashof et Zeuner ; elle est de la forme pv^{μ} = constante; μ est égal à 1,035, quand la vapeur est sèche, et à $1{,}035 + 0{,}1\,x$, quand le mélange renferme une proportion

[1] Cette indépendance est la caractéristique d'une détente *adiabatique*, sans perte ni gain de chaleur.

x de vapeur : ainsi μ prend une valeur 1,115 quand il y a 80 pour 100 de vapeur et 20 pour 100 d'eau. Mais l'action des parois intervient énergiquement dans le phénomène de détente, par évaporation du liquide condensé du chef de la détente ; la buée qui tend à se former est revaporisée au contact du métal chaud, et la loi des pressions se trouve modifiée par là même. On a beaucoup discuté sur cette question, mais Hirn a mis fin à toute controverse par ses célèbres expériences. Les lois propres des vapeurs saturées, les modifications apportées à ces lois par la présence de l'eau entraînée et l'action réchauffante des parois ont pour résultat final de donner à μ une valeur très voisine de 1, de telle sorte qu'on puisse admettre sans erreur sensible que la vapeur se détend dans les cylindres comme si elle suivait la loi de Mariotte. Nous tirerons parti de cette observation en étudiant le cycle des machines à vapeur : nous représenterons par une hyperbole équilatère la courbe de détente de la vapeur d'eau dans un cylindre, car l'équation $pv =$ constante est celle d'une semblable courbe. C'est du reste une hyperbole sensiblement équilatère qui est fournie par l'indicateur de Watt quand on l'applique sur des cylindres de machines. On constate pratiquement cet autre fait, à savoir que, pendant la détente, il y a toujours une certaine vaporisation d'eau par la paroi.

Retenons donc ces deux faits de notre étude des vapeurs saturées : la détente se fait comme si le mélange d'eau et de vapeur obéissaient à la loi de Mariotte, et cette détente produit une vaporisation d'eau aux dépens du calorique des parois.

Il nous reste enfin à examiner une dernière question relative aux vapeurs, celle de leur vitesse d'écoulement : elle a été traitée magistralement par Zeuner, auquel nous empruntons les conclusions suivantes : l'écoulement de la vapeur saturée à travers un orifice étroit n'est pas autre chose qu'une rapide détente, à laquelle on peut appliquer tout ce qui vient

d'être dit ci-dessus. Il y aura condensation ou évaporation, selon les circonstances dans lesquelles s'opère cette détente et suivant que la pression d'eau contenue à l'origine dans la vapeur est plus ou moins grande ; mais généralement la vapeur ne contient jamais assez d'eau pour qu'il y ait évaporation, et l'on observe le plus souvent une condensation, qui est proportionnelle à la chute de température.

Voici d'après Zeuner les vitesses d'écoulement de la vapeur quand elle s'échappe dans l'atmosphère.

PRESSION A LA CHAUDIÈRE EN ATMOSPHÈRES	VITESSES D'ÉCOULEMENT EN MÈTRES PAR SECONDE
2	481,71
3	605,57
4	681,48
5	734,32
6	774,89
7	807,57
8	834,90
9	858,33
10	878,75
12	913,00

IV. **Le cycle de la machine à vapeur.** — Nous avons vu dans le paragraphe précédent que, pour transformer le calorique en travail, il fallait dilater un fluide au contact du foyer, le faire détendre ensuite, le refroidir (et par suite le contracter) par le refrigérant, et enfin le ramener à son état initial par une compression : lorsque la chaleur est fournie par le foyer et reprise par le refrigérant à température constante, et que les détentes et compressions s'opèrent suivant des adiabatiques, c'est-à-dire sans perte ni gain de chaleur, le cycle parcouru donne le meilleur rendement ; c'est le cycle de Carnot auquel convient l'équation $\rho = \frac{T - t}{T}$.

Il s'agirait de réaliser dans la machine à vapeur un cycle qui fût la reproduction exacte du cycle de Carnot ; c'est un idéal, avons-nous dit, mais on doit essayer de s'en rap-

procher; dans ce but, on pourrait concevoir et même construire la machine suivante.

Supposons une chaudière, disposée sur un foyer, et communiquant avec un cylindre, muni d'un piston mobile; chauffons-y, à une température T, un kilogramme d'eau et vaporisons-le. A mesure que la vapeur se forme, elle passe dans le cylindre, chasse le piston devant elle, et produit le

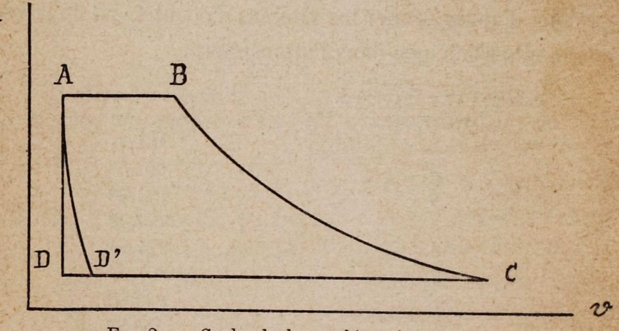


Fig. 2. — Cycle de la machine à vapeur

travail de *pleine pression* suivant la ligne AB, qui est parallèle à l'axe des pressions: notons que cette ligne est une isothermique, car la vapeur reste dans toute cette opération à la température T de la chaudière. Mais qu'on interrompe à un moment donné la communication entre la chaudière et le cylindre : la vapeur, renfermée derrière le piston, subira une détente, que nous ne pouvons faire rigoureusement adiabatique, mais qui n'en différera guère, si la détente est rapide; cette détente, figurée par la courbe B C, a pour effet de faire baisser la température de la vapeur de T à t, en même temps que la vapeur produit un travail supplémentaire. Nous n'arrêtons la détente qu'au point où la température de la vapeur est devenue t : c'est le moment de faire intervenir le refrigérant, dont la température est elle-même égale à t. Le piston recule alors, expulse la vapeur, la pousse dans le condenseur où elle se condense à température constante t,

suivant le chemin C D, figuré par une isothermique. Si l'on arrêtait cette condensation en D et que l'on interceptât la communication entre le cylindre et le condenseur pour comprimer la vapeur restante, et refouler le mélange d'eau et de vapeur à la chaudière, on arriverait à réintégrer dans la chaudière le kilogramme qui en est sorti et la machine s'alimenterait d'elle-même ; si de plus cette compression était commencée au point voulu, pour que toute la vapeur fût liquéfiée et ramenée à la température initiale T, nous pourrions fermer la série d'opérations et nous aurions bien réellement constitué un cycle. Ce cycle serait comparable à celui de Carnot et jouirait de toutes ses propriétés ; la machine atteindrait le rendement maximum.

Mais est-ce une fiction ou une réalité que nous venons de faire passer sous les yeux du lecteur ?

Pour ce qui est des adiabatiques, on ne saurait prétendre à leur réalisation ; mais le fait de la compression suivant D A n'est pas une impossibilité. Il est vrai que la réintroduction de la vapeur liquéfiée par compression dans la chaudière, présenterait quelques difficultés ; toutefois il serait inexact de la déclarer absolument irréalisable.

Les machines à vapeur de l'industrie reproduisent fort bien le cycle théorique au début de la série d'opérations ; les diagrammes relevés sur les cylindres montrent en effet une ligne d'admission à pleine pression presque parallèle à l'axe des volumes, comme A B, puis une courbe de détente assez voisine de B C ; néanmoins, nous constatons que dans la pratique la détente est poussée moins loin que ne l'exigerait la théorie. Ainsi, pour produire dans une machine à condensation une chute de température de 152°,2 à 35°, qui est la température des condenseurs, il faudrait détendre quarante-cinq fois au moins la vapeur admise au cylindre : jamais on ne fait d'aussi longue détente. La troisième phase, celle de la condensation se retrouve aussi dans les machines réelles, mais ici il faut relever une différence essentielle et profonde entre

la théorie et la pratique. Théoriquement, on devrait ramener à la chaudière la vapeur à l'état d'eau, ayant la température T; en pratique, on pousse la condensation à fond, toute la vapeur est liquéfiée à la température t, et il faut alors reprendre cette eau par une pompe spéciale et la refouler dans la chaudière, où le foyer devra l'amener de t à T : voilà en quoi les deux cycles ne sont plus comparables.

Cette imperfection du cycle entraîne un abaissement du rendement, que nous évaluerons plus loin ; qu'il nous suffise pour le moment de la signaler.

Le cycle, au lieu d'être ABCDA (fig. 2) sera donc ABCDD′A.

Quelquefois, il est vrai, le diagramme du cycle réel prend une forme analogue à celle du cycle théorique ; c'est quand on opère de la compression. Mais on se ferait illusion, si l'on croyait pouvoir identifier les deux cycles dont les courbes se ressemblent si bien : en vérité, la compression ne réalise pas les conditions théoriques annoncées ci-dessus, parce qu'elle n'est pas assez complète pour aboutir à la liquéfaction du mélange d'eau et de vapeur, et pour son réchauffement à la température T. Le seul avantage de cette compression partielle consiste dans la suppression des pertes résultant des espaces nuisibles, comme nous le verrons bientôt.

Du fait de la non-réalisation pratique du cycle théorique résulte une perte d'effet, que M. Zeuner a pu calculer et qui s'élève à près de 8 pour 100.

Mais il y a encore d'autres imperfections tendant à abaisser le rendement de la machine à vapeur, nous allons les signaler successivement.

1° *Perte d'effet par détente incomplète.* — Ainsi qu'il a été dit précédemment, il est impossible de faire détendre la vapeur jusqu'à ce qu'elle ait pris la température du condenseur ; on perd donc du travail, en déformant le cycle de la sorte. Cette perte peut être estimée à 18 pour 100 dans une machine alimentée de vapeur à 5 atmosphères et détendant au 1/6.

2° *Perte d'effet due à la canalisation à vapeur.* — La pression de la vapeur qui entre au cylindre n'est pas égale à la pression régnant dans la chaudière : la canalisation d'amenée de la vapeur cause en effet une dépression, d'autant plus sensible que cette canalisation est plus longue et de moindre section ; cette dépression étant de 7 pour 100 fait perdre environ 2 pour 100 sur le travail de la machine.

3° *Perte d'effet provenant de l'inégalité de la contre-pression au cylindre et au condenseur.* — Un bon condenseur, maintenu à 35 degrés, ne devrait donner que 0,1 atmosphère de compression sur le piston ; on en constate généralement 0,2 ; d'où une perte de 4 pour 100.

4° *Perte d'effet produite par les entraînements d'eau.* — Impossible de chiffrer cette perte d'une façon absolue car elle varie avec les conditions mêmes de l'établissement du moteur ; ainsi, dans une machine à grande détente et à condensation, la proportion d'eau entraînée par la vapeur n'influe pas sensiblement sur le rendement. Néanmoins, dans la majorité des cas, le primage est une cause de perte.

5° *Perte par l'espace nuisible.* — On appelle espace nuisible le vide laissé derrière le piston, quand il arrive à fond de course ; il y a toujours un vide, mais on peut le réduire au minimum, et dans bien des machines il est tout au plus égal au 1/60 du volume de la cylindrée. Sa valeur moyenne est égale à 1/20 ou à 1/25.

Il est facile de comprendre que la vapeur renfermée dans l'espace nuisible n'effectue aucun travail de pleine pression ; mais, comme cette vapeur se détend ensuite, elle contribue à augmenter la pression pendant la détente et elle produit alors du travail. L'espace nuisible est donc une cause de déchet dans la période de pleine pression, mais ce déchet peut être réduit à une quantité négligeable pendant la période de détente ; les espaces laissés derrière le piston à fond de course diminuent donc toujours le rendement, mais

effet est minimum dans une machine à longue détente, à égalité d'espace nuisible.

M. Zeuner a calculé le déchet résultant d'un espace nuisible égal au 1/20 de la cylindrée, quand on détend au 1/6, la pression de la vapeur étant de 4,5 atmosphères à l'introduction, et il a été conduit à assigner à une telle machine une perte de 5 pour 100 ; mais il fait observer, avec raison, que l'espace nuisible change les valeurs de presque toutes les pertes d'effet, aggravant les unes, notamment celles qui résultent de la détente incomplète, et diminuant les autres. Un résultat curieux ressort de ce calcul, c'est que la présence de l'espace nuisible augmente le travail effectif de la machine : ce fait, paradoxal en apparence, provient de ce que le travail de la détente devient plus considérable quand le poids de vapeur admis au cylindre augmente ; le diagramme le montre bien, attendu que la courbe de détente se rapproche moins rapidement de l'axe des abscisses.

L'ensemble des pertes que nous venons d'évaluer par le détail s'élève à environ 40 pour 100 [1]. L'intérêt des constructeurs leur a fait chercher les moyens de réduire ces pertes au minimum ; pour cela, ils ont fait de longues détentes, et ils ont disposé l'admission et l'échappement de manière à ce que les pressions devant et derrière le piston fussent aussi égales que possible à celles de la chaudière et du condenseur. Pour corriger l'influence des espaces nuisibles, on s'est ingénié à supprimer les longs conduits d'amenée et de départ entre les fonds et le tiroir, ce qui a conduit au cylindre Corliss : mais on a surtout essayé de faire de la *compression*. Ce mot demande une explication.

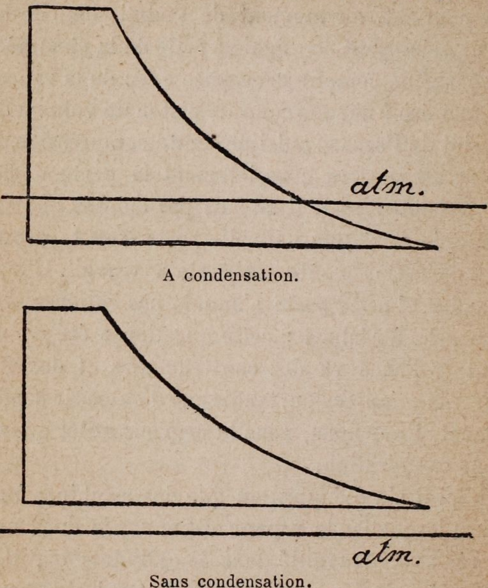
On fait de la compression, lorsque l'orifice d'échappement se ferme avant que le piston ne soit arrivé à fond de course : toute la vapeur de la cylindrée n'est alors point poussée au

[1] Nous n'avons point encore tenu compte des pertes provoquées par les résistances passives du mécanisme.

condenseur, et il en reste une portion dans le cylindre, qui est comprimée dans les espaces restés libres quand le piston est arrivé au bout de sa course. Il suit de là que l'espace nuisible contient, au moment de l'admission, de la vapeur dont la pression peut être égale à celle de la chaudière; on est donc dispensé de remplir cet espace avec de la vapeur fraîche et on économise à chaque coup de piston un volume de vapeur égal à celui de l'espace nuisible. Cette compression de vapeur peut faire disparaître complètement la perte d'effet due à l'espace nuisible; mais il ne faut pas oublier que cette compression crée alors une nouvelle perte d'effet, provenant de ce que l'opération coûte un certain travail. Il y a lieu de se demander si cette perte n'annule pas entièrement le gain qu'on cherche à réaliser; cette question a été résolue différemment et l'on a vu des constructeurs et des ingénieurs préconiser la compression, tandis que d'autres la condamnaient absolument. Pour nous, nous la croyons utile, quand elle est faite sans exagération.

Jusqu'ici il n'a été question que des machines à condensation, dans lesquelles la vapeur est envoyée dans un réfrigérant après avoir travaillé dans le cylindre; or, il y a une autre manière de fermer le cycle, c'est en lâchant simplement la vapeur dans l'atmosphère; dans ce cas, la contre-pression, au lieu d'être 1/10 d'atmosphère, est supérieure d'au moins 1/10 à celle de l'atmosphère. Il est évident, par l'inspection des deux diagrammes ci-contre, dont le premier est à condensation, tandis que le second est sans condensation, que l'on retire plus de travail d'un kilogramme de vapeur dans le premier cas que dans le second; mais il ne faut pas oublier que la condensation coûte de l'eau, qu'elle exige des appareils assez coûteux et que la manœuvre des pompes occasionne une dépense de travail. Malgré cela, la condensation laisse toujours un bénéfice important, que nous pouvons évaluer à plus de 15 pour 100; le cycle sans condensation donne nécessairement une diminution de rendement, par le

seul fait de l'élévation de température du réfrigérant, qui se trouve à plus de 100° au lieu d'être au voisinage de 40°; il se produit d'autres pertes encore et notamment par les en-



A condensation.

Sans condensation.

Fig. 3.

traînements d'eau, dont l'influence est augmentée. Sur ces divers points, la théorie est complètement d'accord avec les idées des praticiens.

V. **Rendement de la machine à vapeur.** — L'équation de rendement $\rho = \frac{T - t}{T}$ nous permet de déterminer exactement le coefficient maximum d'utilisation de la calorie dans une machine dont on connaît les températures limites; c'est le cas d'une machine à vapeur et nous allons faire ce calcul pour la marche avec et sans condensation, entre des pressions déterminées, en admettant que le cycle de Carnot soit réalisé.

PRESSION à la chaudière	TEMPÉRATURE T	MACHINES			
		à condensation : $t = 313°$		sans condensation : $t = 377°$	
		chute de températ.	ρ	chute de températ.	ρ
	degrés	degrés		degrés	
14 atm.	468	135	0,33	91	0,19
12 —	461	148	0,32	84	0,18
10 —	453	140	0,31	76	0,17
8 —	444	131	0,29	67	0,15
6 —	432	119	0,27	55	0,13
5 —	425	112	0,26	48	0,11
4 —	417	104	0,25	40	0,065

Nous avons supposé un condenseur à 40° centigrades (313° absolus) dont la pression serait égale à 0,07 atmosphère ; pour la machine sans condensation, la pression étant de 1,15 atmosphère, la température de la vapeur de décharge a été prise égale à 104° centigrades (377° absolus). Les rendements à 14 atmosphères de pression sont respectivement égaux à 0,33 et 0,19 ; ils tombent à 0,25 et 0,095 aux basses pressions. Cette comparaison fait ressortir le bénéfice de la condensation et elle permet d'apprécier aussi l'avantage des hautes pressions pour les machines sans condensation ; le rendement double de 4 à 14 atmosphères, alors qu'il n'augmente même pas de moitié dans la machine à condensation.

Les chiffres qui précèdent ont une grande valeur de relation, mais ils n'ont aucune valeur absolue, car, nous l'avons dit maintes fois déjà, ils correspondent au cycle de Carnot ; or ce cycle n'est pas réalisé dans la machine à vapeur ; le cycle réel de ces machines est un cycle modifié, déformé et malheureusement dégradé. Nous avons insisté suffisamment sur les imperfections du cycle réel dans le paragraphe précédent pour que nous ne revenions pas sur ce sujet. L'ensemble de ces imperfections produit un déchet de près de 40

pour 100 sur le rendement théorique du cycle de Carnot pour une machine à condensation alimentée de vapeur à 152°, soit à 5 atmosphères de pression ; le rendement maximum qu'on puisse donc espérer dans ces conditions serait de $0,26 \times 0,60 = 0,16$. Le rapport de ce rendement du cycle réel au rendement du cycle de Carnot serait donc de $\frac{0,16}{0,20} = 0,60$: c'est ce que Hirn a appelé le *rendement générique* de la machine. Ce rapport caractérise nettement le degré de perfection du cycle. Il pourrait s'élever à 0,65, voire même à 0,68 si l'on réduisait au maximum les imperfections du cycle ; mais on se bercerait d'un fol espoir si l'on se flattait de dépasser ce chiffre.

Voyons à quelle consommation de charbon correspondent ces rendements. Nous avons vu [1] qu'un kilogramme de charbon, dégageant 8500 calories, renferme une énergie potentielle de 3.612.500 kilogrammètres ; on en tirerait par le cycle de Carnot $3.612.100 \times 0,26 = 939.250$ kilogrammètres ; le cycle réel devrait donner $3.612.500 \times 0.16 = 578.000$ kilogrammètres. Comme le cheval-heure équivaut à un travail de $75 \times 3600 = 270.000$ kilogrammètres, nous produirions ce cheval-heure dans le premier cas par $\frac{270.000}{939.250} = 0^{kgr},280$ de charbon, et dans le second cas par $\frac{270.000}{578.000} = 0^{kgr},467$.

Or, nous sommes fort loin de ce résultat en pratique ; une machine, alimentée à 5 atmosphères, munie d'un condenseur à 40° centigrades, consomme pour le moins 900 grammes de charbon ; son rendement pratique tombe donc à 0,083, car 900 grammes renferment une énergie de 3.251.250 kilogrammètres, sur lesquels nous n'en utilisons que 270.000 et nous voyons que $\frac{270.000}{3.351.250} = 0,083$.

[1] *Cf.*, p. 22.

Bref, la machine donnerait 0,26, si le cycle de Carnot était suivi ; elle donnerait 0,16, si nous avons tenu compte de tous les déchets ; mais en réalité, son rendement n'est que de 0,083 dans la marche industrielle. Le premier chiffre est le maximum imposé par la théorie bien entendue ; le second semblerait devoir être ce qu'un art consommé pourrait espérer ; mais c'est le troisième que l'on obtient, malgré tous les soins et en dépit de tous les artifices.

Ce peu de mots révèle clairement l'état de la question en 1891, après un siècle d'efforts et de succès indiscutables. La théorie pure assigne un rendement de 26 et l'on obtient 8, soit à peine le tiers de l'énergie utilisable !

On demande souvent aux thermodynamistes pourquoi ce désaccord entre leurs calculs, qui indiquent 16 et la pratique qui donne 8 : cette demande les a longtemps embarrassés. Ils faisaient observer que, entre le travail disponible par le cycle et le travail recueilli au frein, il fallait faire intervenir toutes les pertes produites par les résistances passives des organes, frottements du piston, des glissières, de l'arbre dans ses paliers, etc. ; ils invoquaient de plus les pertes par conductibilité et par rayonnement de la chaleur.

Mais il faut reconnaître que ces derniers éléments ne paraissaient pas suffisants pour expliquer cette chute profonde de 16 pour 100 à 8 pour 100.

Nous savons aujourd'hui d'où provient ce désaccord.

Il tenait à une étude incomplète du fonctionnement de la machine à vapeur.

Cette étude a été entreprise par Hirn ; elle a été poursuivie par ses disciples de l'École de Mulhouse ; ces recherches ont abouti à la *Théorie* expérimentale que nous allons exposer dans le chapitre suivant.

CHAPITRE II

THÉORIE EXPÉRIMENTALE DE LA MACHINE A VAPEUR

I. **L'Action de paroi.** — Le 13 avril 1843, Combes présentait à l'Académie des sciences un mémoire sur la machine à vapeur, dans lequel il signalait à l'attention des théoriciens l'action physique qu'exercent sur la vapeur les parois métalliques des cylindres : la portée de ce travail fut considérable. Secondé par Thomas, professeur distingué de l'Ecole Centrale des Arts et Manufactures, Combes démontra que la machine à vapeur ne devait pas être considérée comme un simple mécanisme dont on puisse analyser les fonctions sans tenir compte des propriétés réelles du fluide saturé, mais qu'il fallait absolument faire intervenir dans le cycle des opérations les échanges de calorique qui ont lieu entre la vapeur et le métal. A cet ingénieur distingué revient l'honneur d'avoir provoqué une réaction contre les théories artificielles établies jusqu'alors pour appliquer le fonctionnement des machines et les variations de leur rendement. Hirn n'a jamais manqué de rendre hommage à Combes de cette initiative.

Mais Hirn développa singulièrement l'œuvre de son prédécesseur; c'est lui qui inaugura, en 1854, la méthode féconde d'observation et d'étude à laquelle sont dus les remarquables progrès réalisés dans ces derniers temps par les machines à vapeur. Ses premières publications furent insérées dans le *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse* et ce fut sous les auspices de cette puissante Société que Hirn fonda son école ; il commença d'abord par rappeler l'attention des ingénieurs sur les enveloppes de vapeur inventées par Watt, mais abandonnées depuis longtemps, puis il étudia l'influence

de la surchauffe de la vapeur et créa une méthode expérimentale d'essai des machines existantes. Ce fut en 1873 qu'il entreprit ses fameuses expériences avec ses deux élèves MM. Leloutre et Hallauer ; il les compléta en 1875, avec le concours de MM. Hallauer et Grosseteste, de Mulhouse, et Dwelshauvers-Dery, de Liège. Ces mémorables épreuves établirent le bien-fondé de la théorie du maître ; elles démontrèrent à l'évidence que les parois des cylindres se comportent comme de véritables réservoirs de chaleur, qui empruntent et restituent tour à tour du calorique à la vapeur pendant son travail. Cette action est considérable ; elle modifie profondément le cycle et entraîne les plus graves conséquences au point de vue économique. Hirn l'a analysée et discutée méthodiquement, et il l'a introduite de force dans les théories scientifiques, malgré l'opposition de quelques adversaires plus savants que pratiques, quelquefois trop opiniâtres.

Avant d'aborder le fond de la théorie expérimentale, établie sur les données de Hirn, nous devons faire comprendre d'abord à nos lecteurs ce que signifie cette *action de paroi*, dont nous venons de signaler l'influence si grande.

La vapeur saturée fournie par la chaudière est dans un état d'équilibre tel, que toute soustraction de chaleur entraîne sa condensation partielle, sans changement de température ; réciproquement, toute addition de chaleur détermine une vaporisation partielle du liquide. Vapeur et liquide sont donc à l'état de saturation ; il suffit que le mélange touche un point par lequel il reçoit ou perd de la chaleur pour que toute la masse subisse une modification de pression. C'est sur ce fait que repose le curieux théorème de la paroi froide de Watt : qu'on introduise de la vapeur dans une enceinte de dimensions invariables, dont les parois n'ont pas partout la même température, et l'on constatera toujours qu'au bout d'un temps déterminé, plus ou moins long, la tension finale de la vapeur sera celle qui répond à la température la plus basse. La rapidité avec laquelle la masse entière atteint ce

minimum de tension dépend de l'étendue de la région froide, qui produit le phénomène, mais l'expérience montre que cette rapidité est toujours grande. C'est qu'en effet la paroi agit triplement sur le mélange d'eau et de vapeur ; elle agit par conductibilité, par rayonnement et par convection.

La conductibilité intervient par contact ; au contact du métal froid la vapeur se condense en mouillant la paroi ; l'équilibre du mélange se trouve rompu et la pression monte ou baisse ; c'est ainsi que s'exerce d'abord l'action de paroi.

Le rayonnement s'exerce ensuite sur la masse gazeuse qui remplit le cylindre. J'ai fait de cette question l'objet d'une étude spéciale [1] : je vais m'efforcer d'en résumer succinctement les résultats, pour autant qu'ils sont applicables à la théorie des machines. Faible est l'influence du rayonnement dans un cylindre dont la paroi de fonte a été polie par le frottement du cercle du piston : cela provient de ce que le pouvoir émisif de cette surface polie est minime et que de plus les vapeurs, et surtout les gaz, sont athermanes pour les radiations émises au voisinage de 100°. Grande est par contre l'influence de la convection : c'est ce facteur puissant que mes expériences ont surtout mis en évidence. La convection est cette transmission du calorique qui s'opère par l'intermédiaire des molécules gazeuses en mouvement ; ces molécules s'échauffent en touchant le corps chaud, puis elles sont entraînées par le courant produit par cet échauffement et elles cèdent la place à d'autres molécules, qui viennent prendre du calorique à leur tour. Ce renouvellement se fera continûment et il sera d'autant plus rapide que le fluide sera plus mobile ou plus agité, la convection s'activant par là même. L'échauffement d'un gaz ou d'une vapeur contre une paroi peut dès lors être extrêmement rapide : il croît avec le

1 A. Witz, *Essai sur l'effet thermique des parois d'une enceinte sur les gaz qu'elle renferme*, thèse soutenue en 1878 devant la Faculté des sciences de Paris.

rapport S de la surface des parois au volume de l'enceinte limitée par elle. J'ai montré par une expérience décisive qu'il suffit de 1/20 de seconde pour qu'une quantité de chaleur sensible passe de la paroi d'un cylindre au gaz qui s'y détend; cette quantité sera plus grande encore pour une vapeur que pour un gaz; elle est suffisante pour qu'il ne soit jamais possible d'observer une détente rigoureusement adiabatique.

Comment nierait-on dans ces conditions l'action de paroi?

Hirn a aussi publié une observation dans laquelle la rapidité de la transmission du calorique est très grande : en recevant 306 grammes de vapeur surchauffée à 231 degrés dans un cylindre, il constatait en moins d'un quart de seconde une condensation de plus de 100 grammes et un refroidissement concomitant de 87 degrés.

L'action de paroi est donc indéniable : acceptons-la comme un fait d'observation.

II. **Influence des parois sur le cycle.** — L'action de la paroi doit se manifester tout le long du cycle des opérations qui se succèdent périodiquement dans le cylindre: mais elle s'exercera avec plus ou moins d'intensité aux divers phases de ce cycle et elle pourra même changer de sens. Nous dirons que cette action est positive ou négative; positive, lorsque la vapeur cèdera de la chaleur au métal; négative, quand l'inverse se produira. L'intensité du phénomène sera traduite par la proportion relative de vapeur condensée ou de liquide vaporisé au contact de la paroi.

Voici par quel procédé Hirn a réussi à évaluer ces quantités de vapeur produite ou condensée: le poids d'eau consommée par une machine dans une journée de travail peut être déterminé directement par un jaugeage exact de l'eau d'alimentation de la chaudière; on en déduit la quantité d'eau consommée par coup de piston, car il est aisé de relever par un compteur le nombre de coups donnés dans un jour. On sait donc quel est le poids d'eau et de vapeur fourni au cylindre pour l'accomplissement du cycle; une expérience

au calorimètre fera connaître la proportion relative d'eau vaporisée et d'eau liquide.

Introduisons ce mélange dans le cylindre : il se développe sur le piston une certaine pression, un peu inférieure à celle de la chaudière, par suite des résistances et des condensations subies en route ; cette pression se mesure par un petit manomètre spécial inventé par Watt, et appelé *l'indicateur de Watt*. Un piston, maintenu par un ressort, marque par sa position la valeur de la pression, et un crayon la trace sur un cylindre tournant, dont le mouvement est solidaire de celui du piston de la machine : on sait donc, pour n'importe quelle position du piston, quelle est la pression exercée sur lui par la vapeur.

Or, plaçons-nous au moment de l'admission ; la vapeur est venue remplir l'espace nuisible et la portion du cylindre laissée libre derrière le piston : le volume total occupé par cette vapeur à l'instant précis où l'orifice d'admission se referme est donc aisément calculable ; du volume on passe au poids par les tables de densité. Nous connaissons donc le poids de la vapeur admise par coup de piston ; ce poids ainsi calculé doit être identiquement le même que celui que nous avons déduit ci-dessus de l'alimentation de la chaudière.

Mais, chose étrange, nous serions-nous trompés ? Le poids de vapeur déduit de l'alimentation de la chaudière, est plus considérable que le poids calculé par le volume de vapeur admise !

Il est vraisemblable, se dit Hirn, en constatant ce fait pour la première fois, que notre piston peu étanche laisse passer une certaine quantité de vapeur, que le diagramme de l'indicateur n'accuse pas, mais que l'on retrouve dans le compte de l'eau vaporisée à la chaudière. On procéda donc à une vérification du piston : mais il était parfaitement jointif.

A quoi tenait donc cette différence ?

Elle provenait uniquement de ce que, pendant l'admission, la vapeur de la chaudière rencontre des parois métalliques

(conduits, cylindres et pistons) qui sont à une température moins élevée ; elle se condense contre ces parois par contact immédiat ; sa pression baisse ; mais la vapeur qui afflue empêche cet abaissement de se produire d'une manière sensible et une quantité déterminée de fluide vient remplacer celui qui s'est liquéfié. La densité de la vapeur augmente par ce fait même et nous voyons pourquoi la quantité de vapeur calculée est moindre que celle qui est fournie réellement au cylindre. C'est M. Leloutre qui trouva le premier cette ingénieuse application ; Hirn l'adopta et en fit la base de son admirable théorie *expérimentale*.

La condensation produite à l'admission est essentiellement variable d'une machine à l'autre ; elle varie de 25 à 65 pour 100 ; pour une machine monocylindrique à grande détente, à condensation alimentée de vapeur humide, mais à haute pression, elle est maximum, tandis qu'elle sera minimum pour une compound, recevant de la vapeur surchauffée à une pression modérée.

Du moment qu'il y a condensation de vapeur, il y a gain de chaleur pour la paroi, et le métal s'échauffe nécessairement pendant l'admission.

Voici quelques chiffres extraits de la *Théorie mécanique* de Hirn ; on avait calculé que chaque coup de piston consommait 42 grammes de vapeur, alors que la consommation réelle fut de 107 grammes ; la condensation était par conséquent de 65 grammes, soit de 60 pour 100, et le gain de chaleur correspondant atteignait 32,5 calories.

Suivons la vapeur renfermée dans le cylindre durant la phase de détente qui succède à l'admission : le piston avance, l'espace occupé par la vapeur se détend et la pression baisse. Hirn décrit en ces termes [1] les phénomènes complexes dont le cylindre est alors le théâtre : « Lorsque l'afflux de la

[1] Hirn, *Exposition analytique et expérimentale de la théorie mécanique de la chaleur*, t. II, 1876, p. 36.

vapeur est coupé, dit-il, les parois se trouvent recouvertes d'une couche d'eau plus ou moins considérable. Quand la détente commence et que par conséquent la pression diminue, cette eau se met à bouillir vivement aux dépens de la chaleur que viennent de recevoir les parois pendant l'admission; il se produit donc plus de vapeur; mais en même temps que la masse de vapeur, dont la pression diminue rapidement, se trouble, la quantité présente diminue. D'un autre côté, il est visible que le milieu du cylindre, c'est-à-dire la partie la plus éloignée des deux extrémités où se fait l'afflux de la vapeur, est nécessairement à une température inférieure à celle de ces extrémités ; lorsque le piston est arrivé au milieu ou l'a franchi, il peut donc se condenser de la vapeur contre ces parois médianes, et la masse diminue par cette nouvelle cause. La masse totale de vapeur présente dépend évidemment de la grandeur relative de ces deux effets contraires; elle diminue ou s'accroît pendant le cours de la détente, selon que l'évaporation qui se fait sur les parois est plus grande ou plus petite que la condensation due à l'acte même de la détente et au refroidissement sur les parois médianes ; mais, quel que soit celui de ces effets qui prédomine, les changements de température qui y sont relatifs relèvent visiblement en partie de l'intervention des parois. Celle-ci se fait par un acte de contact direct, et nullement par une propagation de chaleur de proche en proche dans la masse totale de vapeur. »

Ainsi que Hirn le dit dans les lignes qui précèdent, la masse de vapeur renfermée dans le cylindre peut diminuer ou augmenter; le plus généralement elle augmente. C'est le cas de l'exemple que nous avons donné ci-dessus ; à la fin de l'admission, il y avait dans le cylindre 42 grammes de vapeur à 5 atmosphères environ ; à la fin de la détente, la pression n'est plus que d'une demi-atmosphère ; si l'on calcule le poids de cette vapeur détendue par le volume

qu'elle occupe et par sa densité, on trouve 66 grammes. Ce poids est supérieur de 24 grammes au précédent ; il y a donc eu vaporisation d'eau pendant la détente et c'est le tiers environ de l'eau liquide, contenue dans le cylindre sur la fin de l'admission, qui s'est retransformé en vapeur pendant la détente. Le calorique nécessaire a été pris aux parois du cylindre.

Arrivons à la troisième phase, celle de l'échappement de la vapeur vers le condenseur, et écoutons encore la description du maître[2] : « Lorsque la détente est terminée et que le tiroir d'échappement s'ouvre, la pression de la vapeur dans le cylindre s'abaisse instantanément. L'eau qui peut encore tapisser les parois du cylindre possède, ainsi que ces parois mêmes, une température de beaucoup supérieure à celle du condenseur : elle entre donc en ébullition et s'empare rapidement de la chaleur des parois. Cette cession de chaleur dérive donc encore d'un effet de contact direct et non d'un effet de propagation calorifique de proche en proche dans la vapeur. »

Dans cette phase, il y a donc évaporation de l'eau qui ruisselle le long des parois du cylindre et départ de cette vapeur vers le condenseur ; en d'autres termes, il se fait un transport de calorique, par le véhicule de l'eau vaporisée, du cylindre au condenseur. C'est une perte, une perte considérable, sur laquelle Hirn a appelé l'attention des savants, et qu'il a appelée le *Refroidissement au condenseur ;* il le désignait par la notation R*c*. Cette perte dépend surtout de la quantité d'eau contenue dans le cylindre à la fin de la détente : elle est d'environ 15 à 20 pour 100 dans une machine alimentée de vapeur saturée.

Mais elle est quelquefois plus grande encore et Hirn insistait énormément sur son importance. Nous lisons à la page 65 du tome II de sa *Thermo dynamique* : « La cause la plus

[1] Hirn, *Loc. cit.*, p. 37.

désastreuse de perte de chaleur dans la machine à vapeur, c'est l'évaporation instantanée de l'eau qui reste le long des parois des cylindres, à la fin de la détente, et au moment où se fait l'échappement au condenseur. » Observons en effet que l'évaporation pendant l'échappement est nuisible parce qu'elle augmente d'une part le travail de contre-pression sur le piston et que, d'autre part, elle refroidit la paroi métallique et produit au début du cycle suivant une abondante condensation, qui aggrave le mal jusqu'à ce qu'une température de régime soit établie.

En dernière analyse, le refroidissement au condenseur est une cause de détérioration du cycle des plus graves ; la quantité de chaleur perdue par cette voie peut dépasser de beaucoup la quantité de chaleur qui se transforme en travail ; c'est donc un des éléments dont il importe le plus de tenir compte quand on dresse le bilan d'une machine à vapeur.

Il nous reste enfin à étudier la dernière phase dite de *compression*, qui est la moins connue de toutes, mais non la moins intéressante, car elle prête à de sérieuses difficultés d'interprétation.

Au moment où l'échappement se ferme, le retour du piston produit une compression de la vapeur restante dans l'espace nuisible ; Zeuner a fait voir (et nous avons répété ci-dessus sa démonstration) que la compression annule l'effet des espaces nuisibles, au point de vue de la consommation ; Hallauer a vérifié l'exactitude de ce théorème, mais il a été plus loin. Il a prouvé que la compression est le meilleur procédé pratique pour diminuer la perte au condenseur ; on pouvait le prévoir, parce qu'une fermeture anticipée de l'échappement restreint le temps pendant lequel le cylindre communique avec le condenseur ; il passe donc moins de vapeur au condenseur et le refroidissement ne peut devenir aussi marqué.

La compression ferme ou du moins achève le cycle : mais

nous devons faire observer que les phénomènes qui viennent de se produire vont avoir un écho sur le cycle suivant. En effet, le refroidissement au condenseur a fait baisser la température des parois du cylindre ; mais la soupape d'admission va se rouvrir, déversant dans le cylindre un flux de vapeur, qui se condensera au fur et à mesure de son arrivée au contact du métal refroidi. C'est ainsi que se fait cette liquéfaction considérable qui marque le début du cycle et dont on se rend compte assez difficilement *a priori*.

L'ensemble des observations que nous venons de rapporter constitue la base de la théorie de Hirn : elle repose essentiellement sur l'expérience et ne peut donner lieu qu'à des difficultés d'interprétation ; on ne peut nier les faits, tout au plus pourra-t-il arriver qu'on en déduise d'autres conséquences. C'est ce qui s'est présenté en effet dans une discussion survenue entre Hirn et M. Zeuner.

La première objection de M. Zeuner est relative au mélange comprimé dans l'espace nuisible sur la fin du cycle ; Hirn suppose que la vapeur refoulée derrière le piston est sèche, Zeuner prétend qu'elle est au contraire chargée d'eau. Il en résulterait que les phénomènes découverts par les ingénieurs de Mulhouse et attribués par eux aux parois seraient dus plutôt à une certaine quantité d'eau rémanente dans le cylindre. Zeuner objecta encore que Hirn n'avait pas tenu compte dans ses calculs de la quantité de vapeur renfermée dans les espaces nuisibles. Ces critiques furent extrêmement sensibles au vénérable savant alsacien, et il se hâta d'y répondre avec le concours de son dévoué Hallauer ; nous croyons être vrai en déclarant que la réfutation fut supérieure à l'attaque. Toutefois on serait dans l'erreur si l'on niait absolument l'influence de l'eau à laquelle Zeuner empruntait ses arguments : tout ce que l'on peut affirmer c'est que l'hypothèse de Hirn est aussi acceptable que celle de Zeuner. Comme elle a de plus l'avantage d'être plus utile et plus facilement applicable, nous lui donnerons la préférence.

III. **Analyse des effets de la surchauffe, des enveloppes et des détentes en cascade.** — Il ressort de ce qui précède que la théorie générique des machines à vapeur resterait bien incomplète, si elle ne faisait pas entrer dans ses équations le résultat de l'échange de calorique effectué incessament entre la vapeur et la paroi.

Mais le phénomène découvert et analysé par Hirn est trop complexe pour pouvoir être embrassé par une équation unique : il est permis de douter qu'on y réussisse jamais.

Pour le moment, l'école de Hirn se contente de donner la justification de certaines dispositions, usitées dans la pratique, dont la théorie pure ne s'occupait guère et dont elle renonçait en tous cas à expliquer les heureux résultats : tels sont les emplois de la surchauffe, des enveloppes et des détentes successives. Nous allons en faire tour à tour une étude complète.

La surchauffe de la vapeur s'obtient en faisant passer la vapeur à sa sortie de la chaudière à travers un appareil tubulaire, généralement placé dans les carneaux, dans lequel elle prend une température élevée sans que sa pression augmente. Ainsi Hirn a pu amener à 231° la vapeur débitée par une chaudière dont la pression normale était de 4, 5 atmosphères et la température de 145°.

Cette pratique a pour premier effet d'augmenter la chute de température et par suite le rendement de la machine : nul ne contestera jamais cet avantage. Si la surchauffe n'est pas entrée dans la pratique courante, cela provient de ce qu'elle entraîne une certaine complication et qu'elle expose les bourrages et les huiles à se brûler rapidement.

Il est vrai que ce dernier danger est peu à craindre. C'est qu'en effet on arrive bien difficilement à amener jusqu'au cylindre la vapeur maintenue à l'état de surchauffe : en réalité, on n'obtient guère mieux que d'alimenter le cylindre de vapeur *sèche*. Ce fait est démontré par les expériences de 1873 et 1875 faites sur la célèbre machine du

Logelbach : la vapeur arrivait saturée, mais sèche, au cylindre après avoir subi une surchauffe de 90 à 100 degrés.

Le tableau suivant, extrait du mémoire de Hallauer, permet d'apprécier exactement le rôle des surchauffeurs ; il donne synoptiquement les résultats obtenus avec une même machine, à la même détente, selon qu'elle reçoit de la vapeur saturée ou surchauffée.

	VAPEUR SATURÉE	VAPEUR SURCHAUFFÉE
Détente.	1/4	1/4
Température de la vapeur. .	145°	231°
Eau entraînée.	1 p. 100	0
Poids de vapeur sèche calculée par coup de piston. .	257gr,1	286gr,6
Poids observé.	369,5	306,5
Condensation.	112,4	19,9
Poids d'eau liquide à la fin de la course.	94,0	37,3

L'action de la surchauffe ressort clairement de ces quelques chiffres : que voyons-nous en effet de changé dans les deux expériences dont nous rapprochons les résultats? En premier lieu, la quantité de vapeur condensée à l'admission est presque 6 fois moindre; la chaleur cédée aux parois est donc fort diminuée. En second lieu, le poids de l'eau liquide à la fin de la course est notablement réduit ; il en résulte une réduction notable aussi sur le refroidissement au condenseur. Or, il ne faut pas oublier que la présence de l'eau à la fin de la détente est la cause de perte la plus désastreuse dans la machine à vapeur. Troisièmement enfin, notons que le travail de détente est un peu augmenté, car le poids de vapeur sèche est supérieur.

L'économie due à la surchauffe est indéniable ; elle atteint, d'après Hirn, 20 pour 100 à 210°, 31 à 225° et 47 à 245°, quand la machine n'est pas pouvue d'enveloppe et que la détente s'opère dans un cylindre unique. Mais il faut reconnaître que cette économie dépend de circonstances nom-

breuses ; ainsi Hirn rapporte qu'un industriel de ses amis ayant essayé la surchauffe sur une machine sans enveloppe, à deux cylindres, obtint un résultat négatif, alors que tout faisait espérer une économie sérieuse.

La surchauffe est moins économique dans les cylindres à enveloppe ; cette constatation nous amène à étudier la grave question des enveloppes.

C'est Watt qui eut l'idée d'entourer le cylindre d'une enveloppe à circulation de vapeur : Farey, qui nous a transmis les idées du maître dans un ouvrage devenu très rare [1], explique l'emploi de cette chemise de vapeur en remarquant que, si le condenseur doit être refroidi le plus possible, le cylindre doit être maintenu à la température la plus élevée. Il y a dans ce peu de mots une intuition du théorème de Carnot, mais je n'y trouve pas l'intelligence réelle des effets de paroi, car il suffirait d'une enveloppe isolante pour répondre au but cherché par Farey. Aussi négligea-t-on l'enveloppe de vapeur pour veiller surtout à l'isolement thermique de la paroi : Péclet préconisa l'emploi des garnissages de coton de 15 centimètres d'épaisseur qui réduisent au minimum les pertes par rayonnement extérieur : le feutre, le liège, le papier donnent encore de meilleurs résultats. Mais l'action de l'enveloppe de vapeur n'est pas du tout celle d'une enveloppe de protection ; elle intervient activement dans le cycle, comme nous allons le démontrer.

Et d'abord affirmons son utilité ; elle a été constatée par Combes, Rankine et Hirn et estimée par eux à 10 ou 25 pour 100 suivant les cas. Emery a réalisé une économie de 13 pour 100 sur les machines du navire *Bache* en marchant tour à tour avec ou sans enveloppe. Enfin, voici des chiffres relevés par MM. Farcot, sur une machine Corliss du type Bède et Farcot :

[1] Farey, *On the steam Engine.*

	AVEC ENVELOPPE	SANS ENVELOPPE
Travail indiqué.	168,3 chevaux	176,5 chevaux
Eau consommée par heure. .	1400 litres	1770 litres
Charbon brûlé par heure. .	160 kil.	212 kil.
Charbon brûlé par cheval-heure.	950 gr.	1200 gr.
Eau consommée par cheval-heure.	8kg,300	9kg,950

L'économie est de 27 pour 100.

On ne nie plus guère aujourd'hui cette économie, bien qu'elle soit rarement aussi grande; mais on discute sa cause.

De fait, il y a dans ce résultat quelque chose de fort difficile à expliquer; dans un essai de Hirn, la dépense de vapeur par coup de piston étant de 125 grammes, on releva une condensation de 4gr,8 dans l'enveloppe; ces 4gr,8 représentent l'apport de calorique fait au cylindre par la vapeur de circulation de la chemise; or, il est hors de proportion avec le résultat obtenu, qui fut un bénéfice de 25 pour 100.

Il a fallu de nombreuses expériences et une analyse profonde des résultats pour jeter quelque lumière sur cette question si ardemment controversée. M. Pasquier[1] a résumé clairement l'état de la discussion en 1883 dans les mots suivants :

« Par coup de piston, la machine à enveloppe ne dépense pas moins de vapeur que la machine sans enveloppe, mais cette vapeur est mieux utilisée. Avec l'enveloppe, la quantité de vapeur condensée pendant l'admission est considérablement réduite; la revaporisation pendant la détente est fortement augmentée. Par suite, le travail pendant la détente est augmenté et la valeur du refroidissement au condenseur se trouve presque annulée.....

[1] *Etude des machines à vapeur basée sur les expériences de MM. Hirn et Hallauer*, Louvain, 1883, p. 73. Ce résumé des travaux de l'École de Mulhouse est excellent et fort complet.

Quand l'enveloppe fonctionne, une portion relativement considérable de chaleur est consacrée à augmenter le travail de la détente, tandis que le contraire a lieu quand l'enveloppe est supprimée. »

Si l'on compare l'action de l'enveloppe à celle d'une surchauffe modérée, on fera les remarques suivantes : la surchauffe intervient favorablement dans le cycle durant l'admission, la détente et l'échappement; l'enveloppe n'agit au contraire que pendant l'admission et la détente, et elle produit une certaine perte pendant l'échappement. Un grand nombre d'ingénieurs sont plus favorables à la surchauffe qu'à l'emploi des enveloppes.

Les heureux effets de l'enveloppe de vapeur ont conduit M. Domkin, de Londres, à essayer des enveloppes à flammes de gaz; le procédé consiste à chauffer la paroi par un brûleur Bunsen. M. Dwelshauvers-Dery, de Liège, a fait des essais suivis sur des machines munies de ce dispositif et il a obtenu les résultats suivants :

	AVEC CONDENSATION	SANS CONDENSATION
Diminution des pertes par la paroi.	6,3 p. 100	16,4 p. 100
Augmentation des autres pertes	5,5 —	13,3 —

Il reste un certain bénéfice, mais il ne suffit pas pour faire adopter dans l'industrie le réchauffeur d'enveloppe de M. Domkin.

La vapeur des enveloppes peut être stagnante ou bien en circulation ; quel dispositif faut-il préférer ? Hallauer conseillait le premier, Hirn le second, et nous sommes de son avis, car la vapeur en mouvement échauffe bien mieux le métal : par contre, nous ne nierons pas que la vapeur soit moins sèche après avoir tourbillonné dans l'enveloppe.

Abordons maintenant la question des détentes successives, pour laquelle les expériences de Hirn ont encore révélé des

arguments nouveaux. Nous résumerons un travail présenté par nous, en 1890, à la Société industrielle du Nord [1].

Théoriquement, on ne détend jamais assez la vapeur ; pratiquement, on a tort bien souvent de dépasser le 1/6 ou 1/8 : cettte contradiction entre les résultats du calcul et ceux de l'expérience tient à ce que la théorie générique ne donne aucune place dans ses équations à l'action de paroi.

La perte au condenseur est d'autant plus grande que la détente est plus complète, quand elle s'effectue dans un seul cylindre et que la chute de température est plus grande. L'enveloppe limite cette perte, nous venons de le voir, mais on obtient le même résultat en détendant la vapeur dans une série de cylindres, de telle sorte que pour chacun d'eux la chute de température ne soit qu'une fraction de la chute totale, le dernier des cylindres seul se trouvant mis en communication avec le condenseur. Cette manière de faire avait été déjà inaugurée par Watt ; elle a été remise en usage grâce aux travaux de Woolf, d'Edwards, d'Elder et surtout en France, de Benjamin Normant.

L'expérience a établi d'une façon définitive que, dans les machines Woolf ou Compound, à vapeur saturée, munies d'enveloppes, la perte au condenseur est extrêmement réduite. Dans une expérience faite sur une Woolf, le poids d vapeur était plus grand à la fin de la détente qu'au début, parce que la paroi avait revaporisé la majeure partie de l'eau du mélange : la perte au condenseur n'était que de 4 calories, alors que l'eau condensée dans l'enveloppe avait cédé 18 calories.

En se servant d'une curieuse machine d'expérience, M. Willams a comparé les condensations à l'admission dans une marche à un, deux et trois cylindres, les résultats de ces essais sont en faveur des multiples expansions, ainsi qu'on le voit par les chiffres suivants.

[1] A Witz, *Etude théorique et expérimentale sur les machines à vapeur à détentes successives.*

	PRESSION : 80 LIVRES		PRESSION : 150 LIVRES	
	Un cylindre	Compound	Compound	Triple expansion
Vapeur condensée à l'admission pour 100.. .	23,7	5,2	4,09	1,32

La plus grande surface que présentent les parois des cylindres compound et à triple expansion comparativement à celles d'une machine mono-cylindrique semblerait devoir réduire à zéro le bénéfice résultant de la diminution de l'écart des températures, mais on voit qu'il n'en est rien quand on calcule les pouvoirs condensants de ces parois, en multipliant leurs surfaces respectives par la différence moyenne des températures initiale et finale. M. Demoulin a fait ce calcul et il a trouvé pour une Corliss, une compound à deux cylindres et une machine à triple expansion les nombres 89, 69 et 58, qui indiquent pour la double expansion un avantage extraordinaire de 34 pour 100 sur la machine à un seul cylindre.

Au point de vue de la consommation, les expériences de Hallauer ont paru mettre sur le même rang les machines Corliss à un cylindre et les Woolf et Compound à deux cylindres ; mais l'arrêt rendu par ce savant expérimentateur nous paraît contestable. MM. Lœring et Emery ont obtenu en 1877 des résultats qu'on peut opposer à ceux de Hallauer ; les compound leur ont donné constamment des consommations moindres que les machines simples, et l'avantage variait de 12 à 22 pour 100, suivant les machines mises en parallèle.

En 1889, M. Walther-Meunier, de Mulhouse, dont la compétence et l'habileté sont au-dessus de nos éloges, procédait à Mulhouse à une série d'essais comparatifs sur 5 excellentes machines monocylindriques (2 Corliss anciennes, 2 Corliss Creuzot et 1 Corliss Berger) et sur un même nombre de machines Compound de même valeur ; la puissance totale des premières montait à 217 chevaux, celle des secondes à 214 chevaux. Or, la consommation des premières fut, par

cheval-heure indiqué, de $7^{kg},84$, alors que celle des secondes ne dépassait pas $7^{kg},21$: la différence est de 5 pour 100 et elle n'est certes pas négligeable [1].

MM. Sulzer frères, de Winterthur, exposaient à Paris, en 1889, une machine Compound et deux machines à triple expansion, qui ont été très remarquées ; la consommation d'une compound d'une puissance de 500 chevaux est de $6^{kg},353$ de vapeur par cheval-heure indiqué, y compris toutes les eaux de condensation des enveloppes ; une machine à triple détente, qui actionne un moulin de Hongrie, à Nagy-Kikinda, fait 383 chevaux et ne demande que $5^{kg},325$ de vapeur par cheval-heure indiqué. Ces chiffres prouvent la supériorité des machines à triple détente.

Les ateliers d'Augsbourg *(Maschinin Fabrik Augsburg)* ont aussi créé un type à triple expansion, de 200 chevaux, dont M. Schrœter donnait dernièrement une description complète, et qu'il a soumise à une série d'expériences qui méritent à tous égards de fixer notre attention : le travail indiqué étant de 200 chevaux, la consommation par cheval-heure se trouve être de $5^{kg},460$.

On a fait mieux encore dans les machines marines, et l'on a parlé de consommations inférieures même à 5 kilogrammes.

Les citations qui précèdent témoignent des avantages que l'industrie peut retirer des machines à vapeur polycylindriques : de fait, nous avons compté à l'Exposition 30 machines compound, d'une puissance totale de 5450 chevaux, et cette seule constatation nous paraît un argument sérieux en faveur des détentes en cascade.

Néanmoins tout le monde n'apprécie pas aussi favorablement que nous ce genre de machines, et nous croyons utile de faire connaître à nos lecteurs l'opinion de MM. Coste et Bour, telle qu'ils l'ont exposée au 13e Congrès des Ingénieurs en

1 Sur la consommation, le bénéfice était de 8 pour 100 par rapport au cheval indiqué, mais le rendement étant moindre de 3 pour 100, il ne restait que 5 pour 100 par rapport au travail effectif.

chef des associations de propriétaires d'appareils à vapeur. Ils ont conclu dans les termes suivants :

« 1° La machine Compound est nécessairement peu élastique et son fonctionnement normal, pour les conditions de marche prévues par le constructeur, peut devenir défectueux dès que l'on s'écarte de ces conditions ;

« 2° La machine Compound se prête moins bien à une marche régulière que la machine à un seul cylindre, lorsqu'elle est appliquée à un travail variable ;

« 3° La machine Compound ne se prête pas facilement à la marche double [1], en ce sens que les conditions d'établissement d'une machine à condensation différent de celles d'une machine à échappement libre. Ainsi, quand on s'écarte pour une même machine d'une certaine puissance moyenne, on est exposé à trouver pour l'une des deux marches un fonctionnement très défectueux ;

« 4° Les machines Compound sans condensation présentent à un degré exagéré tous les inconvénients que nous trouvons aux machines Compound à condensation ;

« 5° La machine Compound ne nous semble pas pouvoir être considérée comme un moteur industrielle susceptible d'être établi suivant des types fixes, capables de répondre aux exigences générales des ateliers. Bonne pour certains cas, elle peut, dans d'autres, donner lieu à de graves mécomptes, si elle n'a pas été établie dans des conditions spéciales. Il y a même des cas où elle ne devrait jamais être adoptée. La machine à un seul cylindre permet au contraire de constituer des types d'un emploi plus général.

« La détente multiple a certainement amené des améliorations considérables dans les machines marines pour lesquelles elle est admise aujourd'hui sans conteste. »

L'arrêt formulé par les éminents ingénieurs, dont l'étude

[1] C'est-à-dire pouvant marcher à volonté, avec ou sans condensation.

des machines à vapeur est la spécialité, emprunte à leur expérience indiscutée une grande autorité ; néanmoins, nous n'hésitons pas à déclarer que leur critique des machines Compound est exagérée. Nous admettons que cette machine soit un peu moins élastique, et qu'elle ne doive être employée qu'avec condensation ; nous reconnaissons aussi que ce type ne convient pas à tous les ateliers et qu'il ne peut guère être employé pour une puissance inférieure à 200 chevaux. Mais il est excessif de dire que « la machine Compound ne peut pas être considérée comme un moteur industriel susceptible d'être établi suivant des types fixés capables de répondre aux exigences générales des ateliers » ; pourquoi les meilleurs constructeurs ont-ils donc exposé en 1889 une Compound ou une triple expansion ? Enfin, il serait curieux que la marine ait su tirer un parti excellent d'une machine possédant si peu de qualités.

La discussion qui précède nous permet de juger de l'utilité de la *Théorie expérimentale* des machines à vapeur, à laquelle nous avons emprunté nos arguments les plus décisifs. Cet exemple montre bien que, pour connaître à fond tous les éléments de la machine à vapeur, il n'y a qu'une seule manière de procéder : il faut expérimenter d'abord et analyser ensuite minutieusement les résultats obtenus. On fait ainsi, suivant l'heureuse expression de M. Ledieu, l'étude physiologique du moteur. La théorie générique, basée sur la thermodynamique, permet de tracer les grandes lignes des phénomènes ; l'expérience suit le cycle dans ses détails et surprend pour ainsi dire, tous les secrets de sa vie. C'est Hirn qui a été l'initiateur de cette méthode féconde, par laquelle ont été réalisés les derniers et plus remarquables progrès dans les machines à vapeur.

CHAPITRE III

DÉTERMINATION DE LA PUISSANCE DES MACHINES

I. **Détermination du travail absolu, indiqué et effectif.** — La netteté et la précision sont les deux qualités maîtresses du langage scientifique ; il importe donc que les mots en usage soient bien définis et convenablement employés : c'est le but que se proposait le Congrès de la Mécanique appliquée de 1889 quand il formulait les résolutions suivantes :

1° Le mot *force* ne doit être employé que comme synonyme d'effort on proscrit spécialement l'expression ; « transmission de force », qui se rapporte en réalité à la transmission d'un travail, et celle de « force d'une machine », qui n'est que l'activité de la production du travail par ce moteur, ou en d'autres termes le quotient d'un travail par un temps ;

2° Le mot *travail* désigne le produit d'une force par le chemin parcouru par son point d'application, suivant sa propre direction ;

3° Le mot *puissance* doit être exclusivement employé pour désigner le quotient d'un travail par le temps employé à le produire ;

4° En ce qui concerne l'expression numérique de ces diverses grandeurs, pour tous ceux qui acceptent le système métrique, les unités sont les suivantes :

La force a pour unité le *kilogramme.*

Le travail a pour unité le *kilogrammètre.*

La puissance a deux unités que l'on peut employer au gré de chacun ; le *cheval* de 75 kilogrammètres par seconde et le *poncelet* de 100 kilogrammètres par seconde [1].

[1] Il est bon de signaler que le cheval anglais le *horse-power* vaut 75,9 kilogrammètres par seconde.

Les électriciens emploient une autre unité de puissance, le *kilowatt*, valant 1,36 cheval et 1,02 poncelet.

Ces unités étant ainsi clairement définies, il ne saurait plus exister aucune ambiguïté dans leur appréciation et il est à espérer que tous s'efforceront d'en faire un usage correct. La puissance d'une machine est exprimée par le travail qu'elle peut fournir par seconde, l'unité étant de 75, de 100 ou de 102 kilogrammètres par seconde.

Mais ce travail doit lui-même encore être défini ; il y a à distinguer en effet entre le travail disponible, absolu, indiqué et effectif.

Le travail *disponible* est celui que peut fournir le calorique mis en œuvre, quand le cycle a un rendement égal à celui de Carnot ; ainsi le travail disponible d'un moteur consommant par heure 7 kilogrammes de vapeur à 5 atmosphères, la température du condenseur étant de 40°, sera donné par le produit $425 \times 652{,}9 \times 7 \times 0{,}26$ (voir pages 26 et 40) ; cela ferait 504.900 kilogrammètres, soit 1,87 cheval.

Le travail *absolu* et le travail *indiqué* se calculent au moyen des diagrammes fournis par l'indicateur de Watt. Nous avons déjà décrit cet admirable instrument par lequel on obtient le diagramme des pressions et des contre-pressions exercées sur le piston à tout moment de sa course.

Le travail absolu se détermine quand on ne tient pas compte de la contrepression et que, par suite, on suppose le vide parfait derrière le piston : il permet d'apprécier la valeur intrinsèque du moteur : le travail absolu se détermine en retranchant la contre-pression de la pression actionnant le piston. Ce dernier mode de calcul est le plus fréquemment employé : nous allons faire connaître le moyen de procéder à cette détermination.

Pour calculer le travail brut exercé sur le piston et le déduire du diagramme relevé, il suffit de savoir déterminer la pression moyenne exercée sur le piston ; car alors P étant

cette pression moyenne, S étant la surface du piston et C sa course, le travail effectué par coup du piston sera égal à P S C[1] ; par suite, si la machine fait n tours par minute, soit $\frac{n}{60}$ tours par seconde, le travail en chevaux sera $\mathcal{T} = \frac{P\,S\,C\,n}{60 \times 75} = \frac{P\,S\,C\,n}{4.500}$ et en poncelets $\mathcal{T} = \frac{P\,S\,C\,n}{60 \times 100}$ $= \frac{P\,S\,C\,n}{6000}$. Tout revient à déterminer P.

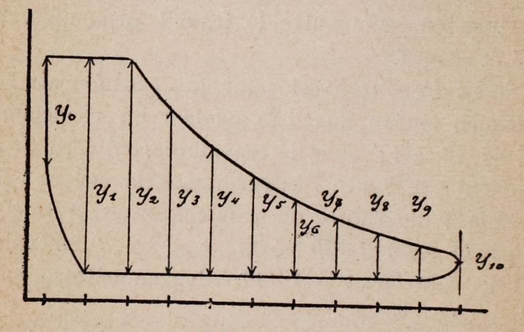


Fig. 4. — Calcul de l'aire d'un diagramme.

Soit donc (fig. 4) le diagramme relevé sur une machine : pour calculer la pression moyenne de la vapeur, nous calculerons d'abord l'ordonnée moyenne de ce diagramme et, à cet effet, nous le diviserons en dix parties égales par des ordonnées perpendiculaires à la ligne $o\ x$, axe des volumes ; soient y_0, y_1, ... y_{10}, les longueurs de ces ordonnées. Simpson a démontré que l'ordonnée moyenne y est donnée par l'équation.

$$y = \frac{1}{30}(y_0 + 4\,(y_1 + y_3 + \ldots + y_9) + 2\,(y_2 + y_4 + \ldots + y_8)\,y_{10}$$

On passe de l'ordonnée moyenne y à la pression moyenne

[1] Voir ci-dessus p. 18.

P en divisant y par le nombre de millimètres correspondants à la pression d'un kilogramme par centimètre carré [1].

Cette méthode donne de bons résultats, mais elle est assez laborieuse ; on emploie plus simplement le planimètre polaire d'Amsler : c'est un petit instrument à pointe mobile, et à roulettes glissant sur le papier et marquant leurs révolutions ; il suffit de faire faire à la pointe le tour du diagramme pour qu'on lise, sur le compteur des roulettes, l'aire ou l'ordonnée moyenne du diagramme.

On peut aussi découper les diagrammes et les peser avec grand soin ; on cherche en même temps le poids d'un décimètre carré du même papier et le rapport des poids donne l'aire ; il n'y a plus qu'à diviser cette aire par la longueur du diagramme pour connaître y et par suite P.

Enfin quelquefois on trace le diagramme sur un papier quadrillé et l'on compte les carrés : cette méthode est peu recommandable.

Il est prudent de s'assurer fréquemment de l'exactitude des échelles, en chargeant la tige du piston d'un poids connu, qu'on rapportera au centimètre carré ; on fera cette vérification à chaud.

C'est un art que de savoir relever de beaux et bons diagrammes, et il faut pour cela du soin, de l'habileté et de l'éducation, car ce n'est pas du premier coup qu'on y réussit. Quelques conseils ne sont donc point superflus. L'indicateur se visse sur des supports spéciaux en bronze, communiquant par des conduits larges avec les espaces nuisibles du cylindre ; on évitera le voisinage des lumières et des points bas dans lesquels s'accumulent les eaux de condensation. On commence par s'assurer que le ressort de l'appareil convient à la pression de la vapeur : sinon on changerait le ressort, car

[1] On peut se dispenser de la mesure des ordonnées en les évaluant directement en kilogrammes au moyen de l'échelle qui accompagne chaque ressort.

on dispose généralement de trois ressorts donnant, par kilogramme de pression sur un centimètre carré, des flexions de 10 à 15 millimètres. Cela fait, il s'agit de donner au cylindre enregistreur un mouvement exactement proportionnel à celui du piston de la machine : on relie donc le cordon, enroulé dans la gorge de l'enregistreur, à la crosse, par l'intermédiaire d'un appareil à réduction, car la course de l'appareil n'est guère que de 130 millimètres. On peut employer en guise de réducteur : soit des balanciers, soit des poulies différentielles, avec ressorts de rappel, mais on obtient les meilleurs résultats avec une poulie à 2 diamètres, dont la plus grande est mue par une corde attachée à la crosse du piston, tandis que la petite poulie transmet le mouvement au cylindre à papier : les diamètres de ces poulies doivent naturellement être proportionnels à la course du piston et à la longueur du diagramme. L'axe des poulies est disposé en forme de vis, afin de pouvoir toujours maintenir dans un même plan les deux brins de la corde. Dans la grande poulie est disposé un ressort en spirale qui maintient le tension des cordes.

Les cordes doivent toujours rester parallèles à elles-mêmes dans leurs divers mouvements, sinon les déplacements de l'enregistreur ne seraient plus proportionnels à ceux du piston. Il faut aussi bien éviter une tension excessive des cordes qu'une tension trop faible, qui les laisserait flotter. Ces cordes doivent être de première qualité, tressées et non tordues ; on s'arrange de façon à ce que le tracé tombe au milieu du papier ; il ne doit point se produire de vibrations, ni de chocs dans les mouvements. Le crayon, qui est une simple pointe de cuivre traçant sur du papier recouvert de blanc de zinc, doit être fin, mais non aigu, de manière à donner un trait délié sans déchirer le papier.

Tels sont les conseils que nous donnons aux jeunes ingénieurs qui entreprennent de relever un diagramme et de calculer le travail indiqué d'une machine.

Le travail *effectif* présente plus d'intérêt pratique : on appelle ainsi le travail immédiatement utilisable sur l'arbre de couche de la machine ; on le mesure à l'aide du frein dynamométrique de Prony. Bien que cet appareil soit connu de la plupart de nos lecteurs, nous croyons utile de le décrire et d'expliquer clairement son fonctionnement.

Un frein dynamométrique est un mécanisme ayant pour objet de maintenir un mouvement uniforme du moteur, en absorbant par un frottement toute l'énergie en excès : le travail du frottement remplace la résistance des outils à mener et il permet de mesurer la puissance du moteur.

Ces freins sont généralement de la classe des freins flexibles : ils se composent d'un lien souple en fer ou en acier, garni de frottoirs en bois, embrassant un arc considérable de la circonférence d'un tambour ou d'une poulie calée sur l'arbre de couche. Les deux extrémités de ce lien traversent une barre rigide, munie elle-même d'un frottoir ; des écrous de serrage, dont le point d'appui se trouve sur la barre, permettent de tendre le frein et de faire appliquer fortement les frottoirs sur la jante de la poulie ; le frein, devenu solidaire de cette poulie, tend à tourner avec elle. Or, on dispose les choses de telle sorte que le mouvement tende à relever la barre rigide ; d'autre part, on charge celle-ci d'un poids P, lequel s'ajoutant au poids mort p de l'appareil, maintiendra la barre horizontale. Quand ce résultat sera obtenu, il y aura équilibre entre le travail dépensé en frottement et le travail de la force $(P + p)$ agissant sur l'extrémité d'un levier de longueur l ; on aura donc, pour un tour, un travail égal à $(P + p)\, 2\pi l$, et pour $\frac{n}{60}$ tours par seconde, une puissance

$$\mathcal{P} = \frac{(P + p)2\pi ln}{60 \times 75} = \frac{(P + p)2\pi ln}{4500} \text{ en chevaux}$$

$$\text{et} \quad \frac{(P + p)2\pi ln}{60 \times 100} = \frac{(P + p)2\pi ln}{6000} \text{ en poncelets.}$$

La première formule donne

$$P = 0{,}001395\,(P + p)\,ln.$$

Il faudrait que la barre rigide fût au-dessous de l'arbre ; mais on ne peut pas toujours réaliser cette condition, et alors l'équilibre est moins stable.

Au lieu de faire soulever des poids par le bras du frein, on peut le faire appuyer, par l'intermédiaire d'une béquille verticale, sur le plateau d'une balance, et peser son action : ce dispositif répond à une rotation en sens inverse de la première.

On emploie le plus souvent comme poulie de frein, une poulie à courroie ordinaire ; mais quelquefois on cale sur l'arbre une poulie spéciale en deux pièces, munie de vis de centrage, agissant sur une paire de faux coussinets, dont la jante présente des rebords. La lubréfaction s'effectue par de l'eau de savon : ce doit être une solution de savon noir au 1/10. On estime qu'on peut absorber par seconde et par mètre carré 20.000 kilogrammètres : il faut environ 1 litre d'eau par mètre carré et par seconde pour rafraîchir suffisamment le métal ; quant au diamètre de la poulie, nous estimons qu'il doit être d'au moins $0^m{,}02$ par cheval de puissance.

Depuis quelque temps, les ingénieurs utilisent le frein de Prony sous une forme nouvelle ; nous voulons parler du frein à corde, qui fournit de bons résultats sans être plus dangereux qu'aucun autre et permet de prolonger à volonté la durée de l'expérience. Voici quel est le principe de ce frein d'absorption : la poulie motrice est embrassée par une corde dont une des extrémités est attachée à un point fixe, tandis que l'autre est tendue par un poids P qui donne lieu à un frottement considérable ; le travail effectué se transforme en chaleur, laquelle est emportée par l'eau de réfrigération ; l'adhérence qui se développe entre la poulie et la corde tend à soulever le poids tenseur et l'on mesure le travail en multipliant ce poids P par la vitesse à la circonférence de la poulie. Pour faciliter le réglage du frein, on attache généra-

lement le bout fixe de la corde à un dynamomètre dont on modifie la tension p par une vis de serrage à double filet : cette tension p est à décompter de la charge P du frein. En lubréfiant la poulie à la plombagine, il nous a été possible de marcher plus de quinze heures de suite, sans arrêt, ne ralentissement, en opérant sur une machine de 100 chevaux indiqués, faisant 100 tours par minute. Je ne crois pas qu'on ait pu poursuivre aussi longtemps une expérience de frein sur une machine de telle puissance.

II. **Rendement organique**. — Entre le piston qui recueille l'équivalent mécanique du calorique utilisé (c'est le travail indiqué) et la circonférence du frein dynamométrique sur laquelle se mesure la résistance tangentielle par laquelle on évalue le travail effectif, il existe des résistances passives qui entraînent une perte de travail ; aussi le travail effectif ne peut-il être qu'une fraction du travail indiqué. Cette fraction permet d'apprécier le rendement *organique* ou *mécanique* du moteur : c'est un coefficient de construction, par lequel on estime bien la perfection du mécanisme ; nous n'insisterons pas sur son importance pratique.

Les causes de réduction du travail indiqué sont les suivantes : c'est d'abord le frottement du piston contre la paroi du cylindre, le frottement de sa tige dans le presse-étoupes, le frottement des tourillons et des pièces articulées, les vibrations et les chocs des organes, les résistances au mouvement des tiroirs, des pompes, de la pompe à air, etc. Zeuner divise très sagement ces résistances en deux parts, l'un qui constitue la résistance constante, persistante dans le travail à vide, l'autre essentiellement variable avec l'effort exercé sur le piston, qu'on peut admettre comme proportionnelle au travail indiqué. Si nous appelons $\mathcal{T}i$ le travail indiqué et $\mathcal{T}e$ le travail effectif, nous pourrons écrire la relation

$$\mathcal{T}e = \beta\,\mathcal{T}i - \alpha$$

ou

$$\frac{\mathcal{T}e}{\mathcal{T}i} = x = \beta - \frac{\mathcal{T}i}{\alpha}$$

Le rendement organique x croîtra par conséquent avec le travail indiqué ; c'était évident.

Le calcul ne pourrait donner avec précision une valeur réelle de x ; aussi procède-t-on toujours par la voie expérimentale en relevant avec soin le travail effectif et le travail indiqué et en divisant le premier par le second. Le procédé est empirique, mais satisfaisant.

Voici généralement à quels résultats on est conduit.

GENRE DE MACHINES	RENDEMENT ORGANIQUE
Machine sans condensation avec faible détente.	0,92 à 0,90
Machine avec détente au 1/6.	0,90 à 0,88
Machine à condensation avec détente au 1/6. .	0,88 à 0,85
Machine Woolf.	0,82 à 0,78
Machine Compound.	0,82 à 0,78

Ce tableau est relatif à une puissance de 80 à 100 chevaux indiqués : on voit que x diminue à mesure que le mécanisme se complique et que la détente augmente. Le premier effet se comprend aisément ; l'influence des longues détentes s'explique de même, et elle résulte de la diminution du travail indiqué, alors que les résistances passives diminuent moins vite. Il est à remarquer que x pourrait devenir égal à zéro, si l'on ne fournissait plus au moteur que la quantité de vapeur strictement nécessaire pour entretenir la vitesse de rotation sans production de travail effectif : c'est le cas de la marche à vide.

Les coefficients ci-dessus se rapportent à des machines parfaitement entretenues, bien construites et dont les organes ont le poids minimum, leurs dimensions étant celles qui sont nécessaires pour supporter sans fléchir les efforts qu'ils doivent transmettre.

A. Dellafond, ingénieur en chef des mines, a déduit d'une série d'expériences faites au Creusot, la relation qui lie le travail effectif au travail indiqué : ce mémoire nous fournit d'intéressantes données qu'il importe de relever [1].

[1] Delafond, *Annales des mines*, t. VI, 8e série, 1884.

Les essais ont été faits sur une machine Corliss du Creusot ayant 550 milimètres de diamètre au cylindre, 1100 milimètres de course ; les espaces nuisibles étaient de 3,65 centièmes du volume engendré par coup de piston. Cette machine pouvait marcher avec ou sans condensation, le tuyau d'échappement portant une soupape à deux voies, qui permettait d'envoyer la vapeur au condenseur ou à l'air libre. La pression pouvait varier considérablement ainsi que la détente : on a obtenu ainsi les résultats consignés dans le tableau suivant :

ADMISSION en centièmes de course	PRESSION à l'admission en kilogr.	TRAVAIL indiqué en chevaux	TRAVAIL effectif en chevaux	x
0,044	2,90	67,2	45,2	0,67
0,065	4,90	117,0	88,7	0,76
0,065	7.60	185.0	144,6	0,78
0,147	2,60	100,0	78,2	0,78
0,155	4,65	177,2	145,0	0,82
0,260	4,76	209,4	178,0	0,85
0,338	2,97	161,8	133,0	0,82
Pleine admission	2,70	215,5	191,0	0,89
0,50 (à vide)	0,70	15,8	0	»

Ces premiers résultats ont été obtenus en marchant à condensation.

Sans condensation, on a relevé les chiffres suivants :

0,106	7,00	125,0	103,0	0,82
0,120	7,50	172,0	148,0	0,86
0,150	4,57	102,3	86,5	0,84
0,262	4,50	149,2	132,3	0,88
0,348	2,75	84,8	71,1	0,84
0,371	4,40	195,3	177,2	0,91
0,50 à vide	1,20	12,3	0	»

On voit que, pour un même travail indiqué, le travail effectif est moindre avec condensation que sans condensation ; il est, toutes choses égales d'ailleurs, moindre aussi quand la pression à l'admission augmente : ce résultat est naturel,

car les frottements de tout genre augmentent avec l'effort exercé sur le piston.

L'ensemble de ces essais a conduit à assigner aux paramètres α et β les valeurs suivantes :

A CONDENSATION

$$\alpha = 16 \qquad \beta = 0{,}902$$
$$\mathcal{T}e = -16 + 0{,}902\,\mathcal{T}i$$

SANS CONDENSATION

$$\alpha = 12 \qquad \beta = 0{,}945$$
$$\mathcal{T}e = -12 + 0{,}945\,\mathcal{T}i$$

III. **Calculs d'établissement.** — Deux problèmes se posent dans la pratique.

Voici le premier : une machine étant donnée, et connaissant la surface S du piston, sa course C, la pression h de la vapeur dans la chaudière, h'' la pression au condenseur, le nombre n de tours par minute et le degré z de détente, on demande quelle est sa puissance.

Le second est réciproque du premier; un ingénieur reçoit la commande d'une machine d'une puissance déterminée, et il cherche à calculer S et C en fonction de h, h', n et z.

Il faut savoir résoudre ces deux problèmes aisément, rapidement, et avec une exactitude suffisante; or, on peut se demander si les théories générique et expérimentale que nous avons exposées ci-dessus sont d'une application immédiate dans ce cas.

M. Bertrand nous répond dans les termes suivants [1] : « Poncelet, dit-il, prescrit, pour calculer le travail d'un coup de piston, de traiter la vapeur, quand elle se dilate sans communication avec l'extérieur, comme un gaz soumis à la loi de Mariotte. L'erreur commise est grande et évidente. Elle ne paraît pas cependant l'être plus que celle qui résulte des théories dans lesquelles, à des principes beaucoup plus

[1] Bertrand, *Thermodynamique*, 1887, p. 264.

exacts, sont associées des hypothèses aussi éloignées de la vérité que l'imperméabilité complète des parois du cylindre à la chaleur. »

En d'autres termes, nous n'avons pas de formules plus exactes que celles de Poncelet, lequel les avait empruntées à Tredgold et à de Pambour ; leur exactitude dépendra du choix de certains facteurs numériques que nous y introduirons. L'aveu a paru humiliant pour la science ; il ne faut pas cependant devenir injuste au point de lui reprocher la complication des problèmes qu'on lui pose.

Nous n'avons guère que des formules empiriques ; mais elles sont pratiques et suffisamment exactes, que nous faut-il de plus ?

Si nous ne détendions pas la vapeur et que la chaudière fût maintenue en libre communication avec le cylindre durant toute la course du piston, le travail, par cylindrée, serait égal à P S C, nous l'avons dit précédemment ; mais S C est le volume V du cylindre, si nous négligeons les volumes des espaces nuisibles ; nous avons donc

$$\mathcal{T} = PV$$

Mais P est la pression effective, c'est-à-dire la différence entre la pression h et la contrepression h' exercées sur les deux faces du piston ; il vient donc

$$\mathcal{T} = (h - h')\,V$$

La puissance en chevaux pour n tours sera

$$\mathcal{P} = \frac{(h-h')\,V\,n}{60 \times 75} = \frac{(h-h')\,V\,n}{4500}$$

ou

$$\mathcal{P} = \frac{(h-h')\,V\,n}{6000}$$

si nous acceptons le poncelet pour unité de puissance.

Mais nous n'avons pas tenu compte de tous les déchets et de toutes les perturbations du cycle ; d'une part, la pression effective sur le piston est moindre que h, alors que d'autre part la contre-pression est supérieure à h' ; de plus, il faut passer du travail brut effectué sur le piston ou du travail

indiqué, au travail utilisable sur l'arbre, c'est-à-dire au travail effectif; c'est par là qu'intervient le rendement organique de la machine. En somme, notre formule donne un résultat trop fort, et nous sommes obligé de le multiplier par un coefficient K, qui sera égal à 0,60 pour 5 chevaux, à 0,85 pour 100 chevaux, et à 0,88 pour une puissance plus considérable. Nous le répétons, tout cela n'est que de l'empirisme tout pur ; mais nous nous hâtons d'ajouter qu'on arrive à des résultats parfaitement acceptables.

Mais on fait toujours de la détente ; abordons maintenant ce cas général.

Après que le piston a parcouru un chemin c, le tiroir d'admission se ferme et la détente commence ; le degré de détente est représenté par le rapport $\frac{c}{C}$ que nous écrirons Z; nous admettrons que la détente s'opère en suivant la loi de Mariotte, ce qui veut dire que la ligne de détente est une hyperbole équilatère. Or, on démontre sans peine que le travail fourni par cette détente est

$$P V Z \log \left(\frac{1}{Z}\right) 2{,}3026$$

ou

$$h V Z \log \left(\frac{1}{Z}\right) 2{,}3026$$

Le travail total est donc :

Pleine admission + Détente. — Travail absorbé par la contre-pression.

$$h V Z \quad + h V Z \log \left(\frac{1}{Z}\right) 2{,}3026 \qquad - h' V$$

Ce qui donne :

$$\mathcal{T} = h V Z \left(1 + \log \left(\frac{1}{Z}\right) 2{,}3026 - \frac{h'}{h} \frac{1}{Z}\right)$$

La puissance $\mathcal{P}$ se déduira de $\mathcal{T}$ comme précédemment et l'on adoptera encore une fois une valeur différente de K suivant la dimension du moteur et la perfection plus ou moins grande du type : nous prendrons les mêmes valeurs que ci-dessus.

La formule usuelle que nous venons d'établir a un grand avantage, elle est élastique et, avec de l'intuition et une parfaite connaissance des conditions faites à leur machine, les constructeurs en tirent un parti excellent, nous le savons ; c'est qu'en effet K n'est pas un coefficient de construction, comme on le dit souvent, ce n'est pas non plus le coefficient de rendement organique, c'est un facteur qui englobe toutes les actions perturbatrices.

M. Pouchet a fait observer avec beaucoup de justesse que la formule de Poncelet conduit toujours à des résultats trop forts; c'est précisément la preuve que K ne doit pas être considéré comme un coefficient de réduction dû aux seules résistances passives. L'art de la construction consiste surtout à élever la valeur de K par l'emploi des enveloppes, de la surchauffe, par l'augmentation des vitesses du piston, etc.; cette valeur de K est l'expression même de la perfection d'une machine. Nous nous rappelons à ce propos que, étant ingénieur d'une grande maison de construction, nous fûmes amené à augmenter un jour la puissance *nominale* de nos divers types; un modèle, que nous proposions à nos clients pour une puissance de 50 chevaux devint, par exemple, le modèle de 55 chevaux; c'est qu'en effet nous avions amélioré notre construction au point d'augmenter K.

Nous pouvons donc accorder toute confiance à nos formules.

Elles résolvent les deux problèmes posés, car de S nous déduirons le diamètre D du cylindre, puisque $S = \frac{\pi D^2}{4}$: on peut calculer $\mathcal{P}$ par S et D, ou bien S et D pour obtenir $\mathcal{P}$.

Nous croyons utile de donner un tableau des valeurs pratiques de D, C, et n en fonction de $\mathcal{P}$, quand la pression est de 5 atmosphères à la chaudière, que la détente Z est au 1/6, et qu'on marche à condensation.

PUISSANCE EN CHEVAUX	DIAMÈTRE DU CYLINDRE	COURSE DU PISTON	NOMBRE DE TOURS PAR MINUTE
10	200 m/m	700	65
15	250	740	62
20	280	780	60
25	320	800	55
30	350	850	52
35	380	900	50
40	400	950	47
50	450	1000	45
60	500	1060	44
70	550	1120	43
80	570	1200	42
100	620	1350	40
150	740	1500	38
200	850	1650	36

Les vitesses qui sont indiquées dans notre tableau pourraient facilement être augmentées, mais il suffit d'une règle de trois pour calculer la puissance correspondante.

Nos formules sont directement applicables aux machines Woolf ou Compound : on ne tiendra pas compte du petit cylindre et l'on calculera la puissance disponible en supposant qu'on effectue dans le grand cylindre une détente égale à celle qu'on obtient par les deux cylindres.

Voici du reste, à titre de document, les dimensions pratiquées par la maison Davey-Paxman et C°, pour ses machines Compound.

PUISSANCE EN CHEVAUX	DIAMÈTRES DU PETIT CYLINDRE	DIAMÈTRES DU GRAND CYLINDRE	COURSE	NOMBRE DE TOURS
24	140 m/m	229 m/m	305 m/m	155
36	178	285	356	155
48	203	330	406	135
60	229	362	457	120
75	253	406	508	110
90	279	438	610	90
120	324	508	610	90
150	381	571	813	70
180	406	635	813	70
225	444	698	914	65
300	495	800	914	65

La pression est de 8 kilogrammes au petit cylindre.

CHAPITRE IV

CLASSIFICATION DES MACHINES A VAPEUR

I. **Machines monocylindriques** — Les dispositions des machines à vapeur présentent une telle variété qu'il est extrêmement difficile d'en faire une classification complète et rationnelle.

Si l'on se place au point de vue seulement de la fonction de la vapeur, on doit distinguer d'abord :

1° Les machines à *simple effet*, dans lesquelles la vapeur ne travaille que sur une face du piston ; ce mode d'action ne se trouve plus que dans quelques machines d'épuisement et dans certains types de marteaux pilons. Nous ne nous en occuperons pas.

2° Les machines à *double effet;* la vapeur agit alternativement sur chaque face du piston : c'est le cas le plus général.

3° Les machines *rotatives;* la vapeur pousse toujours dans le même sens un piston tournant. Ce type, que Watt avait déjà construit, reprend faveur sous le nom de turbo-moteurs : nous en ferons une étude spéciale.

On peut ranger les machines d'après leur objet : nous trouvons alors les machines *fixes*, *demi-fixes*, *locomobiles* et *locomotives;* ces mots sont assez clairs pour ne pas nécessiter de définition. Les locomotives sont exclues du cadre de cet ouvrage.

Les machines sont à *condensation* ou *sans condensation;* dans les premières, la vapeur rejetée hors du cylindre, est condensée à une pression moindre que l'atmosphère ; les secondes, au contraire, déchargent la vapeur à l'air libre et, le piston subit une contrepression toujours supérieure à la pression de l'atmosphère. Nous avons expliqué pourquoi ce

dernier genre est nécessairement moins économique que le premier; mais les machines sans condensation sont moins coûteuses et moins encombrantes, et on leur donne la préférence quand les conditions de simplicité et de compacité priment la question d'économie; leur emploi s'impose du reste quand on manque d'eau, à moins qu'on n'accepte les aéro-condenseurs.

On distinguait autrefois les machines à *haute* et *basse* pression; cette spécification a été abandonnée avec raison, car elle manque de netteté. On marche aujourd'hui à des pressions plus élevées qu'autrefois et l'on va jusqu'à 10 et même 12 atmosphères, quand on fait de l'expansion multiple.

Il y a des machines à un, deux ou plusieurs cylindres, chacun d'eux étant alimenté de vapeur vive ; ou bien on dispose deux, trois et même quatre cylindres en cascade, le premier seul recevant de la vapeur de la chaudière ; telles sont les machines *Compound* à *triple* et *quadruple expansion.* Nous étudierons ces dispositifs, qui sont bien en faveur et qui ont pour eux les promesses de l'avenir.

Mais d'abord, il nous paraît nécessaire de classer les machines d'après la disposition relative de leurs organes. Voici dès lors comment on peut grouper les machines à vapeur, d'après leur orientation, ou la combinaison de leurs organes.

I. *Machines verticales :*

1° A balancier (Watt).

2° A connexion directe. .
- Cylindre en bas
  - Saulnier
  - à bielle en retour.
- Cylindre au milieu
  - à double bielle (Maudslay).
  - à bielle en cadre (Beslay).
- Cylindre en l'air (à pilon).

II. *Machines à tige-bielle :*

1° A cylindre oscillant (Cavé).

2° A fourreau.

III. *Machines horizontales :*
1° A manivelle ;
2° A vilebrequin.

Nous allons successivement passer en revue ces diverses dispositions.

Les machines à balancier sont les plus anciennes, car elles dérivent de la pompe à feu sur laquelle Watt a exercé tout d'abord son génie ; l'emploi du parallélogramme articulé réduit les frottements au minimum. Ce type fut appliqué au début presque exclusivement ; mais aujourd'hui on ne l'accepte plus que pour les machines d'une puissance d'au moins 50 chevaux, et encore n'en construit-on plus guère. Ce sont pourtant d'excellentes machines, bien équilibrées, convenant à merveille pour la condensation, parfaitement régulières, se prêtant facilement à l'emploi des deux cylindres Woolf, mais ce sont des machines encombrantes, coûteuses et à marche nécessairement lente. De cette lenteur de marche résulte un des avantages les plus appréciés de ces machines, c'est leur stabilité et leur faible usure : nous connaissons de ces moteurs qui travaillent depuis soixante ans et que l'on ne remplacera pas de longtemps.

Le manque de place a suggéré l'idée des machines verticales, à connexion directe, dans lesquelles la tige du piston attaque la manivelle par le seul intermédiaire de la bielle, la crosse du piston étant guidée par des glissières qui remplacent le parallélogramme. Ces machines sont de trois genres, suivant la position du cylindre, qui peut être placé par terre, au milieu de la machine ou bien en l'air. Le premier genre était peu rationnel, parce qu'il établissait à la partie supérieure de la machine son organe le plus lourd, qui est le volant ; mais il avait l'avantage de maintenir le cylindre et ses accessoires à la portée du chauffeur mécanicien ; le troisième genre, dit à pilon, parce qu'il ressemble aux marteaux-pilons, évite le premier inconvénient, mais perd l'avantage

réciproque obtenu pour la conduite du moteur: le second genre constitue un moyen terme.

Les machines Saulnier réalisent le dispositif le plus simple qu'on puisse adopter quand on se résout à placer le volant en l'air: elles sont représentées en B sur la figure 5. Le plus souvent le cylindre était disposé entre deux colonnes, supportant un architrave, sur lequel étaient fixés les paliers de l'arbre de couche ; mais on a abandonné plus tard ces formes architecturales, fort déplacées du reste, pour adopter un genre de bâti plus en rapport avec la forme des mécanismes d'une machine. Nous en étudierons plus loin quelques modèles fort répandus.

Pour éviter de placer le volant au sommet du bâti, on a placé la bielle en retour : c'est le type C. Dans ce cas, la tige du piston, qui est démesurément allongée, forme un cadre pour livrer passage à la manivelle; les guides sont à la partie supérieure et la bielle ramène le mouvement au centre du bâti par une bielle fort courte. On ne rencontre plus guère ce dispositif que dans la marine.

Pour éviter de placer le volant en l'air, on pouvait employer la combinaison D, dans laquelle le cylindre occupe le milieu du bâti : on transmettait alors le mouvement de la crosse à la manivelle, soit par une double bielle pendante (type Maudslay), soit par une bielle en cadre (type Beslay). Ces deux modes ont été beaucoup employés vers 1840, mais ils présentaient un sérieux inconvénient: le poids du piston, de la tige, de la crosse, des bielles et des cadres était considérable et on ne pouvait l'équilibrer d'aucune façon ; il s'ajoutait donc à l'action de la vapeur quand le piston descendait; il s'en retranchait, quand le piston remontait, et il en résultait des accélérations que devait vaincre le volant. Par contre, on appréciait beaucoup la simplicité de la construction, la facilité du montage, la réduction au minimum des fondations, le faible encombrement et le bas prix relatif de ces machines: elles étaient toujours établies sans condenseur,

ce qui en simplifiait encore la construction. Il reste encore de nombreux spécimens de ces machines.

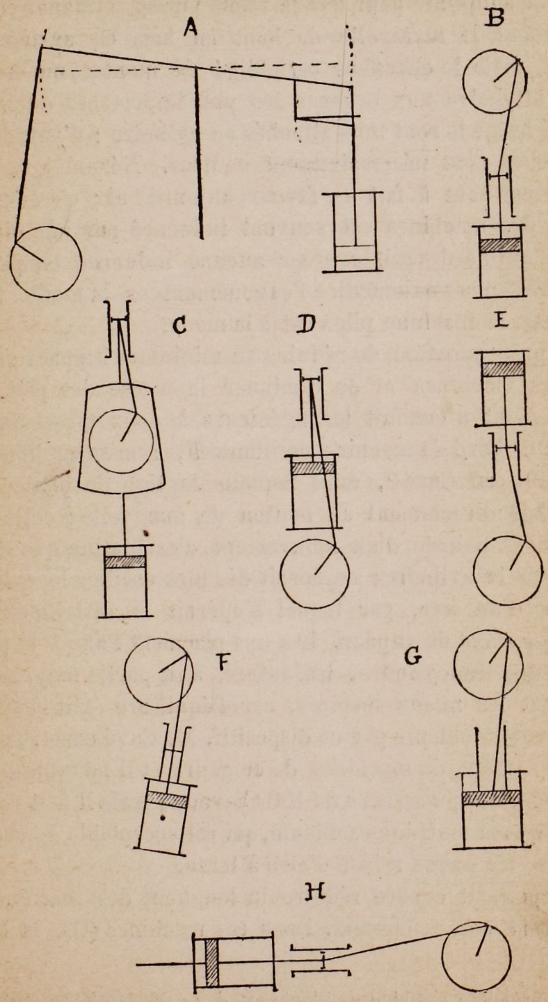


Fig. 5. — Divers types de machines.

On n'en vint que plus tard à la forme pilon représentée en E : le cylindre est alors porté par un bâti massif, à une hauteur suffisante pour que la bielle puisse actionner convenablement la manivelle de haut en bas. Ce système est stable, mais le chauffeur est obligé de monter un escalier pour atteindre aux organes les plus importants de la machine, lesquels sont tous attachés au cylindre : d'autre part, les bielles sont nécessairement courtes. Néanmoins, cette forme est tout à fait en faveur aujourd'hui ; c'est que le choix des machines est souvent influencé par une circonstance qui ne devrait exercer aucune influence en pareille matière, nous voulons dire l'engouement ou la mode. En ce moment, la machine pilon est à la mode.

La préoccupation de réduire au minimum l'espace occupé par les machines et de diminuer la masse des pièces en mouvement a conduit les ingénieurs à deux types mixtes. Ce fut d'abord la machine oscillante F, remise en honneur, en 1840, par Cavé [1], dans laquelle la tige du piston était rattachée directement au bouton de manivelle ; cette tige était donc animée d'un mouvement d'oscillation que devait partager le cylindre ; on faisait dès lors osciller le cylindre autour d'un axe, par lequel s'opérait la distribution et l'échappement de vapeur. Les uns plaçaient l'axe à la partie inférieure du cylindre, les autres, à sa partie moyenne, et c'étaient les mieux inspirés, car l'équilibre était beaucoup plus facile à obtenir par ce dispositif. M. Cavé construisit un grand nombre de machines de ce genre et il ne craignit pas d'aborder des puissances de 100 chevaux ; mais il faut reconnaître que la machine oscillante, qui est acceptable à bord des navires, n'a pas sa raison d'être à terre.

On pouvait encore réduire la longueur des machines en recourant aux fourreaux. Dans ces machines (G), la bielle

[1] La première machine oscillante est due à Murdoch, et elle porte la date de 1785.

est articulée directement au centre du piston, et elle oscille dans un tuyau ou fourreau fixé au piston et traversant le couvercle du cylindre. Ce dispositif, qui a été en grande faveur auprès de l'amirauté anglaise, a autant d'inconvénients que d'avantages : d'une part, il exige des cylindres énormes les joints du stuffing-box présentent une extrême difficulté : de plus, l'introduction d'un grand fourreau dans le cylindre est une cause de condensation ruineuse ; par contre, la transmission du mouvement s'effectue avec une remarquable simplicité et l'on ne saurait obtenir une meilleure concentration de la machine. On ne construit pas du tout de machines à fourreau hors de la marine, mais on a adopté ce dispositif pour les moteurs à gaz avec un réel succès : les conditions sont alors, il est vrai, tout autres que pour la vapeur.

Jusque vers 1850, les constructeurs sérieux n'osaient se hasarder à construire couramment des machines horizontales ; le grand argument qu'on faisait valoir était celui de l'ovalisation du cylindre à axe horizontal. Il est certain, en effet, que le piston et sa tige portent sur les génératrices inférieures et qu'il en résulte d'abord une déformation du cylindre et en même temps une usure inégale des cercles du piston, ce qui constitue une double cause de fuite : or, la condition essentielle d'une machine est d'avoir un piston étanche. On pouvait assurément lutter contre ce défaut en prolongeant la tige du piston à travers le bâti du cylindre; le piston, suspendu sur cette tige, ne porte plus dès lors sur ses génératrices inférieures, mais l'efficacité de cette disposition n'est pas entière, car la tige fléchit toujours un peu, et la tige a d'autre part l'inconvénient d'introduire dans le cylindre une nouvelle cause de condensation. Plusieurs mécaniciens, et des meilleurs, préféraient augmenter l'épaisseur du piston, de manière à répartir sa pression sur une plus grande surface : Hirn leur donnait raison, en constatant que l'on ne pouvait faire de surchauffe dans les machines horizontales,

par défaut d'étanchéité des pistons [1]. Néanmoins, on en vint petit à petit à reconnaître que ces craintes étaient fort exagérées. Le type horizontal est d'ailleurs le plus rationnel à plusieurs égards : on peut surveiller facilement toutes les parties de l'appareil ; les machines peuvent être fixées sur une plaque de fondation ; l'ajustage et le montage s'achèvent entièrement à l'atelier ; on n'a pas à craindre l'instabilité des bâtis et l'on peut aborder les plus grandes vitesses : bref, de nombreuses raisons militent en faveur de ce dispositif. La forme de bâti innovée par Corliss conservait aux machines horizontales leurs qualités en assurant à merveille le guidage de la crosse du piston dans une glissière cylindrique, alésée au tour et parfaitement centrée : c'est le genre qui a prévalu et qui est universellement adopté en ce moment. La seule objection sérieuse à formuler contre ces machines est leur longueur, qui est fort grande quand le condenseur est placé à l'arrière du cylindre : mais rien n'empêche de loger cet appareil dans les fondations, quand on manque de place.

II. **Machines polycylindriques.** — Après avoir décrit longuement les dispositifs divers qu'on a successivement adoptés pour les machines à vapeur, nous allons examiner la question des machines polycylindriques.

La première idée des machines à deux cylindres est due incontestablement à Jonathan Hornblower, qui prit un brevet le 5 novembre 1781 ; le brevet de Watt ne date que du 3 juillet 1782 ; mais si Watt n'a pas inventé la machine, il garde l'honneur d'avoir créé le mot de *compound*. Toutefois, ni la chose, ni le mot ne furent profitables à Hornblower et à Watt.

Plus tard, lorsque Trewithick eut introduit l'usage des pressions élevées, Arthur Woolf revint à l'idée d'employer deux cylindres, et il établit une première machine, à Meux,

1 L'usure des articulations a, de plus, le désavantage de dérégler les axes : c'est un des arguments que font valoir les partians des machines verticales à pilon.

près Londres, en 1806. Ce dispositif se répandit rapidement, car il donnait de bons résultats : mais on a fait plus de machines Woolf en France qu'en Angleterre. Le type adopté était à balancier : les deux cylindres se trouvaient accolés et leurs deux tiges, animées d'un même mouvement, étaient attachées (nous reviendrons sur ce point) à l'extrémité d'une chape et au milieu de l'autre ; les deux pistons avaient donc à peu près même course et ils passaient en même temps par leurs points morts, les admissions et les décharges ayant lieu simultanément. La distribution se faisait souvent par deux tiroirs distincts, souvent aussi par un tiroir unique, placé entre les deux cylindres : la vapeur se détendait en passant d'un cylindre à l'autre. Ces machines marchaient lentement et l'on ne leur demandait guère plus de 35 révolutions par minute : le grand cylindre avait généralement un volume égal à cinq fois celui du petit. La vapeur allait de la chaudière au petit cylindre, sans détente, et, de là, elle était conduite au grand cylindre par une distribution croisée, la vapeur allant du haut du petit cylindre, par exemple, au bas du grand, et inversement. Il est à remarquer que le travail total de la vapeur ne dépend aucunement du volume du petit ; il ne dépend que du volume de vapeur introduit dans ce cylindre, du volume du grand cylindre et de la pression de la vapeur. Le travail est donc le même que si le volume de vapeur introduit donc le cylindre d'admission était directement jeté dans le cylindre de détente et détendu jusqu'à la fin de la course. Le travail sera donc celui que produirait la vapeur dans une machine pourvue d'un seul cylindre : on est disposé à en conclure que le petit cylindre est une superfétation inutile et coûteuse ; mais l'action de paroi s'exerce avec moins d'énergie dans les machines à deux cylindres, et cette seule considération suffit pour légitimer l'emploi de ce dispositif [1].

[1] Voir ci-dessus, p. 57.

Les deux cylindres des machines Woolf sont pourvus d'enveloppes de vapeur. La détente commence souvent déjà dans le petit cylindre et elle se complète dans le grand cylindre. L'espace nuisible se trouve agrandi par la longueur double des canaux d'admission et de transvasement : on se voit obligé pour cela de faire de la compression. La variation de l'effort moteur est faible dans ces machines, car la pression effective change peu sur le piston du petit cylindre et ne tombe à rien que sur le piston du grand cylindre de détente : il en résulte que les pièces fatiguent moins que dans les machines monocylindriques, ce qui permet de construire des machines plus légères et de compenser l'augmentation de poids résultant de l'emploi de deux cylindres.

Au lieu de placer les deux cylindres côte à côte, on fut amené à les superposer en donnant une tige unique aux deux pistons : c'est le dispositif *en tandem* très connu et fréquemment appliqué de nos jours.

Les machines de Woolf présentent un inconvénient, qui nuit à leur régularité ; comme les deux pistons arrivent à fond de course en même temps, il en résulte que le passage des points morts est difficile et que le volant a plus de peine à les faire démarrer tous deux. On a résolu cette difficulté en faisant agir les deux pistons sur des manivelles placées à 90° l'un de l'autre, en sorte que les points morts ne coïncident plus ; dès lors un des pistons se trouve à fond de course quand l'autre n'est qu'à mi-course, et l'on s'est vu obligé de placer, entre les distributions des deux cylindres, un réservoir, dit *receiver*, dans lequel la vapeur est transvasée en attendant qu'elle soit admise à épuiser son énergie sur le cylindre de détente. C'est le type connu sous le nom générique de *machine compound:* en réalité ce n'est qu'une variante de la machine Woolf.

L'interposition du réservoir intermédiaire permet de dire que cette capacité constitue la chaudière du cylindre de détente ; chaque cylindre a donc sa distribution indépendante.

Soit P la pression au premier cylindre, P′ la pression au second cylindre, et P″ la contre pression sur le grand piston ; comme le second cylindre est alimenté par le premier, il conviendrait que P′ fût précisément égal à la pression finale au petit cylindre à fond de course ; après une détente Z, cette pression serait $\frac{P}{Z}$, et il n'y aurait pas de chute de pression entre les deux cylindres. Mais il faut que toute la vapeur rejetée par le premier cylindre, à la pression P′, soit reprise par le second cylindre pour une admission $\frac{1}{Z'}$; si donc nous appelons V et v les volumes des cylindres nous aurons $\frac{V}{Z'} = v$ ou $Z' = \frac{V}{v}$. Cela veut dire que l'admission au grand cylindre doit être égale au rapport des volumes des deux cylindres : si ce rapport est élevé, l'admission sera courte. C'est un inconvénient ; on se voit obligé par suite de faire toujours le rapport assez faible, plus faible que dans les Woolf, et l'on ne dépasse généralement pas 4. Sinon, on aurait une petite chute de pression entre les deux cylindres : mais elle est toujours légère, ainsi qu'en témoigne le diagramme ci-contre (fig. 6) relevé sur une machine compound ; dans la pratique, elle ne dépasse guère un tiers de kilogramme, et la perte de travail résultante est pour ainsi dire inappréciable.

Le réservoir intermédiaire *(receiver)* a généralement un volume double de celui du petit cylindre : c'est une simple conduite, d'assez grand diamètre, reliant les deux cylindres ; on ne doit *jamais* faire de ce réservoir une enveloppe de cylindre, car ce serait méconnaître absolument le principe économique des Compound et compromettre tous leurs avantages. On réchauffe au contraire les réservoirs, soit par une enveloppe de vapeur, soit encore par une circulation intérieure : la surface de chauffe doit être égale au moins à une fois celle du grand cylindre.

La disposition relative des deux cylindres peut varier beaucoup, et c'est une conséquence directe de leur indépendance relative. Tantôt ils sont côte à côte, tantôt bout à bout

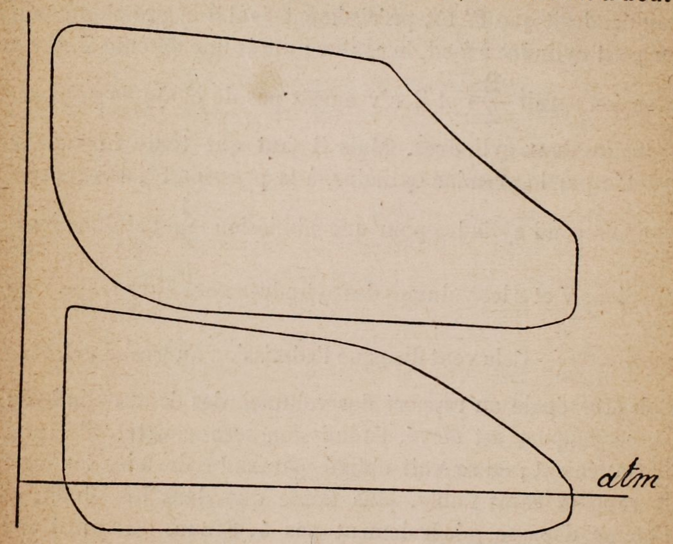


Fig. 6. — Diagrammes Compound superposés.

(en tandem) et quelquefois ils forment deux machines absolument séparées : de prime abord, on croirait une machine à deux cylindres conjugués, car le réservoir intermédiaire est caché sous le sol.

On peut voir ces divers dispositifs réalisés dans les figures 7, 8 et 9.

La figure 7 montre une Compound à pilon : c'est un type fort usité aujourd'hui pour les machines de bateau et qui tend à se répandre dans l'industrie, car il présente de réels avantages, bien qu'il ne soit pas aussi pratique que le type horizontal, au double point de vue de la stabilité et de l'accessibilité de tous les organes. Plusieurs modèles ont été présentés à l'Exposition de 1889.

Pour les machines fixes, on donne généralement la préférence au type horizontal de la figure 8, dans lequel les deux machines sont jumelées, le réservoir intermédiaire étant

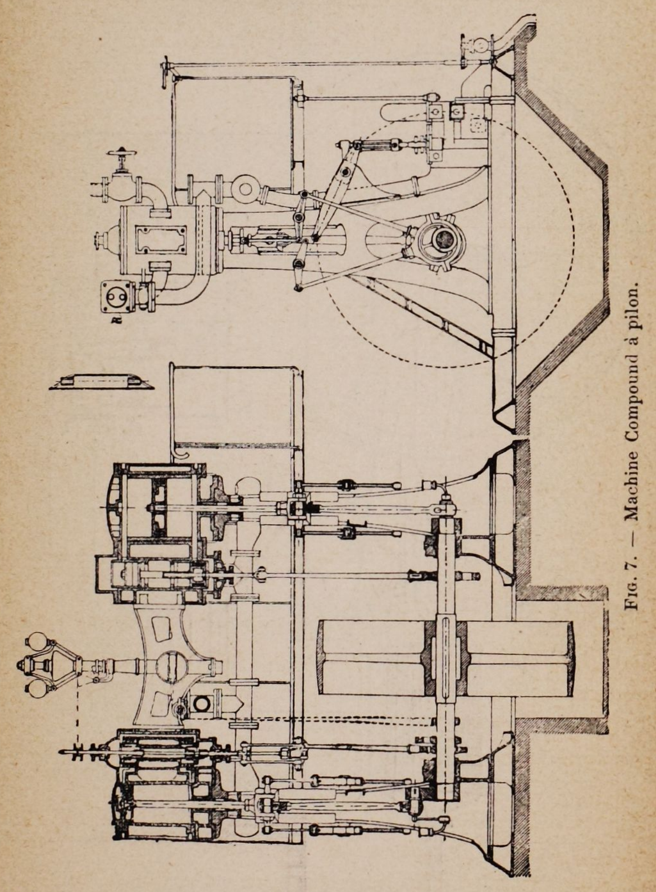
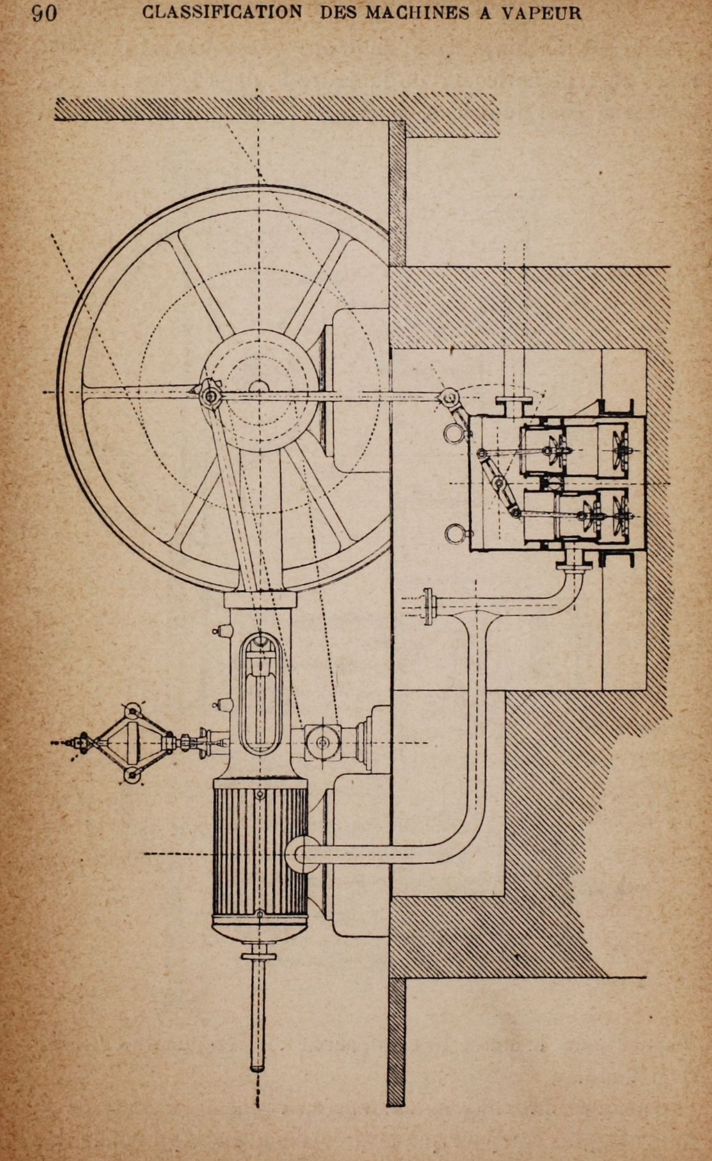


Fig. 7. — Machine Compound à pilon.

disposé sous le sol et le condenseur en dessous du cylindre de détente.

Quelques mécaniciens ont mis en vogue le modèle de la figure 9, plus compact que le précédent, mais qui donne lieu



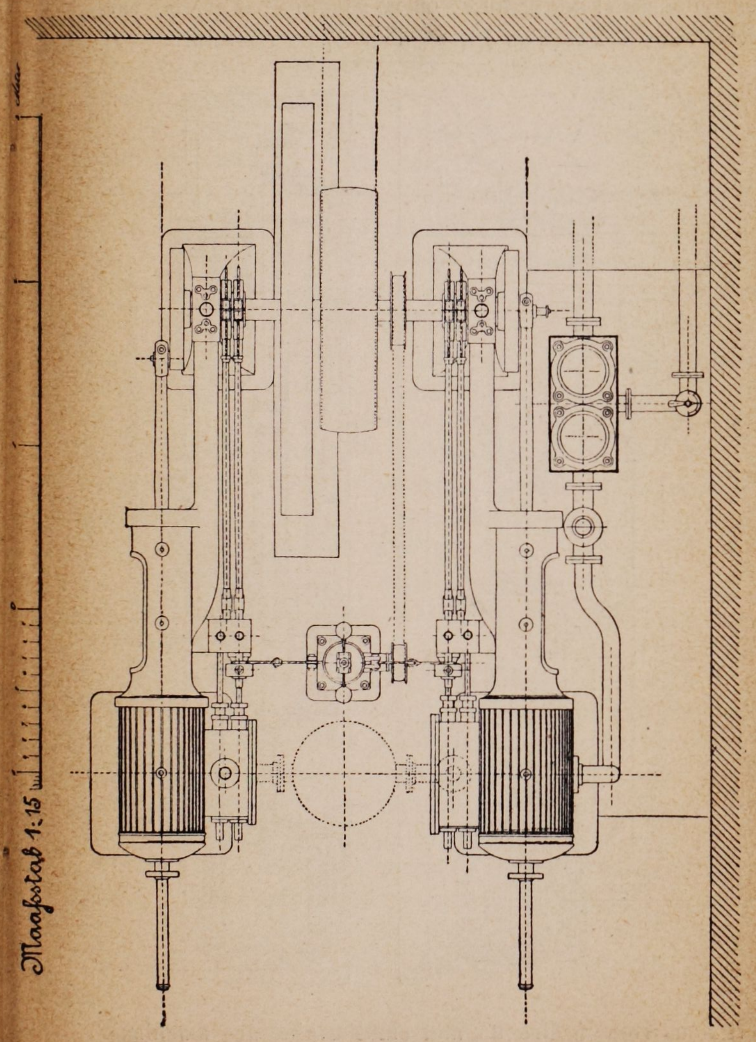


Fig. 8. — Machine Compound horizontale, d'après Th. Schwartze.

à un travail considérable quand on veut procéder à la visite des cylindres et des pistons : on ne se laisse pas arrêter par cette difficulté lorsqu'on dispose d'un espace restreint.

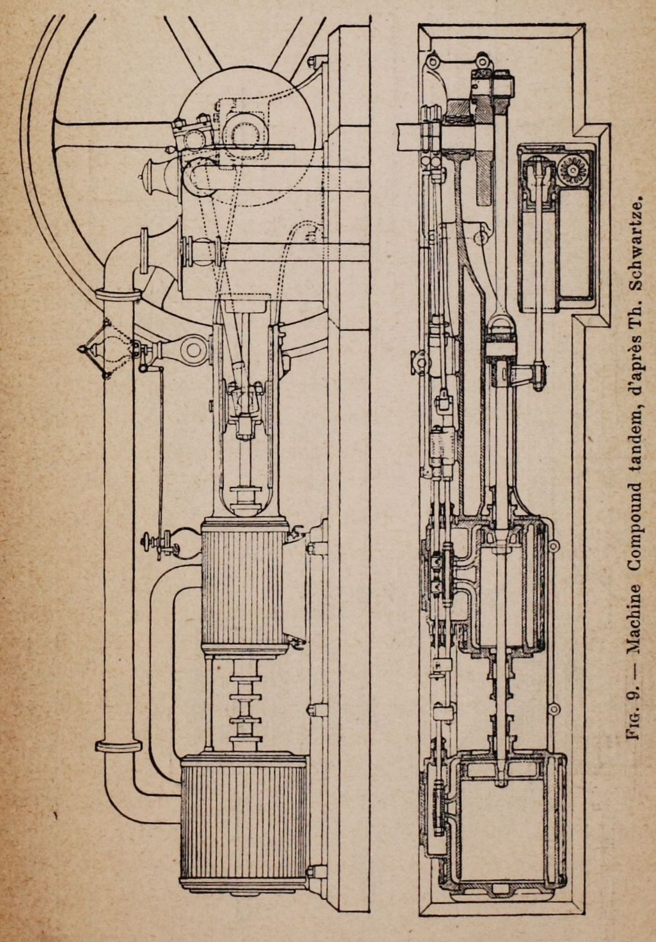


Fig. 9. — Machine Compound tandem, d'après Th. Schwartze.

Il nous reste à dire un mot sur l'origine des machines Compound.

La première indication d'un *receiver* se trouve dans une patente de 1826 au nom de Joseph Eve ; mais il s'agissait de machines rotatives. Vers 1834, le constructeur hollandais Roentgen prit un brevet dans lequel se trouvent décrits tous les éléments des Compound [1] ; mais il faut encore attendre l'année 1860, pour que ce genre de moteurs se répande et soit apprécié. C'est à Benjamin Normand qu'est due la vulgarisation de ces machines ; il prit un brevet en 1856 et construisit, en 1860, la Compound du *Furet*. Pendant les dix années qui suivirent, il construisit ou transforma 25 machines marines et livra un égal nombre de machines fixes. Rowan et Horton, Randolph et Elder et enfin Dupuy de Lôme ont assurément moins fait que Normand pour les machines à double expansion et c'est justice de le déclarer hautement.

C'est lui encore qui a pris la plus grande part au développement des machines à *triple expansion :* il prit un brevet en 1871 et plaça une machine du genre sur le *Montezuma*. En 1880, il en avait fait douze applications, représentant une puissance totale de 4000 chevaux. Des ingénieurs anglais faisaient alors les mêmes essais, mais avec moins de succès : la maison Napier de Glasgow ne réussit pleinement qu'en 1882.

Depuis lors, ce genre de machines a pris un admirable développement dans la marine, au point qu'on n'en construit plus guère d'autres ; on applique également le même système aux machines fixes et l'exemple donné par quelques grandes maisons de construction tend à être suivi par leurs concurrents. A l'Exposition de 1889, MM. Sulzer, de Winterthur, exposaient une machine de 100 chevaux à triple détente et une autre de 370 chevaux ; M. Willans avait produit aussi une machine de 100 chevaux et MM. Weyher et Richemond une autre spécialement destinée à la com-

1 Voyez à ce sujet un rapport de M. Mallet, présenté au Congrès international de mécanique appliquée.

mande des dynamos. Les dispositifs adoptés varient beaucoup ; les uns placent deux cylindres *en tandem* et installent le troisième à côté, en le faisant agir sur une seconde manivelle ; les autres, et c'est le cas de MM. Sulzer, mettent les trois cylindres *en tandem*, le grand cylindre à double effet étant enclavé entre les deux autres à simple effet ; quelques-uns ne craignent pas d'atteler les trois pistons sur une traverse commune actionnant une bielle unique. Pour éviter l'encombrement, on donne souvent la préférence au type pilon, et nous constatons une tendance à abandonner les déclics pour revenir aux tiroirs, par lesquels on obtient sans peine des admissions de 50 pour 100.

Enfin, mais c'est peut-être une exagération, les ingénieurs, paraissent disposés à faire même de quadruples expansions : M. Matter, de Rouen, a créé une machine qui peut marcher à triple ou à quadruple détente. La pratique nous dira à bref délai ce qu'il faut attendre de ces tentatives, audacieuses peut-être, mais assurément fort intéressantes.

CHAPITRE V

ÉTUDE DE LA DISTRIBUTION PAR TIROIR

Étude expérimentale. — Le diagramme relevé sur une machine à vapeur permet d'analyser complètement et d'une manière infaillible le fonctionnement de cette machine : cette courbe, obtenue au moyen de l'indicateur de Watt, rend compte, en effet, de toutes les circonstances des variations de la pression dans le cylindre et l'œil d'un ingénieur exercé sait y lire une indication claire et précise de tous les défauts que peut présenter une distribution.

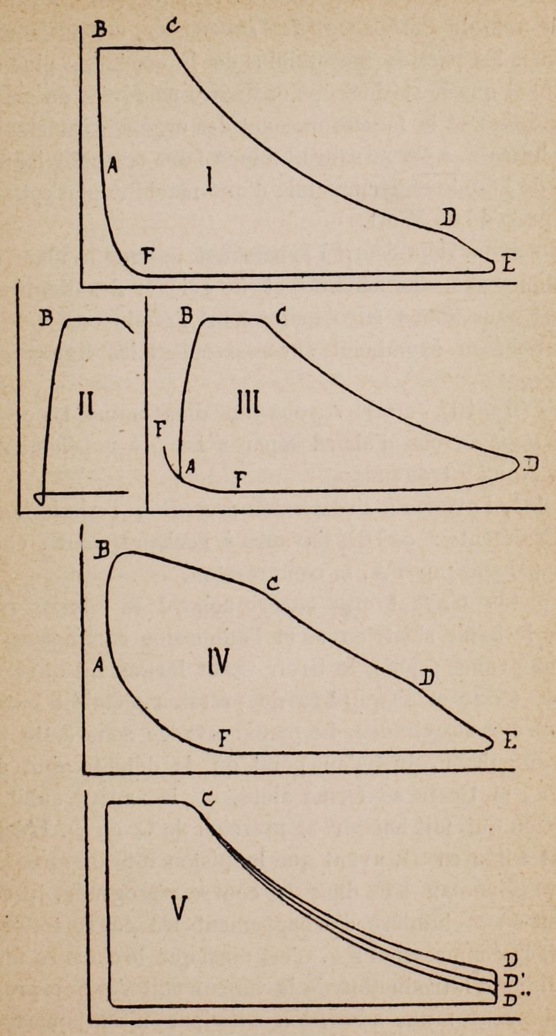


Fig. 10. — Diagrammes corrects et incorrects.

« On a donné avec raison, dit M. Thurston [1], à l'indicateur le nom de *stéthoscope de l'ingénieur*, car il découvre à l'examen les parties inacessibles de la machine, plus complètement que le stéthoscope ordinaire ne révèle au médecin la condition et le fonctionnement des organes intérieurs du corps humain. » On ne saurait mieux faire ressortir les avantages de l'étude expérimentale d'une machine par cet admirable procédé de Watt.

Nous avons déjà décrit l'appareil et indiqué la manière de l'appliquer sur une machine et de relever des diagrammes exacts ; nous allons faire maintenant l'étude complète d'un diagramme en examinant successivement les lignes qui le composent.

En I (fig. 10), nous voyons un diagramme type, dans lequel nous devons d'abord séparer les divers éléments du cycle. Nous y trouvons:

En AB, l'avance à l'admission ; en BC, l'admission ; en CD, la détente ; en DE, l'avance à l'échappement ; en EF, l'échappement ; en FA, la compression.

Le piston n'ayant pas encore achevé sa course rétrograde, le tiroir s'entr'ouvre et l'admission commence avec quelque avance ; puis, le tiroir étant largement ouvert, la vapeur afflue et l'équilibre de pression s'établit entre la chaudière et le cylindre. Le piston avance sous cette puissante impulsion, jusqu'au point où la détente doit commencer ; le tiroir se ferme alors, et la vapeur subit une expansion qui fait baisser sa pression de C en D. L'échappement a lieu en D, avant que le piston ait fini sa course ; il se continue par EF dans la course rétrograde, jusqu'au moment où la lumière d'échappement est couverte, ce qui produit la compression FA. C'est ainsi que le cycle se ferme.

La ligne d'introduction de la vapeur doit s'élever presque verticalement : une admission anticipée n'est jamais blâ-

[1] Thurston, *Histoire de la machine à vapeur*, t. I, p. 129.

mable, si cette avance reste faible, tandis qu'un retard serait nuisible en toute circonstance. Ce retard se marque différemment sur le diagramme, suivant qu'il y a ou non compression : nous donnons en II et III les portions de courbe correspondantes aux deux cas. Le retard n'est généralement pas voulu par le constructeur, mais il résulte du mauvais entretien de la distribution, du jeu des boulons et des articulations.

La ligne d'admission doit être horizontale, de manière à ce que la pression exercée sur le piston soit maximum pendant toute la durée de cette période : c'est ce qu'on voit en BC. La plupart du temps cette ligne s'abaisse vers l'axe des volumes; cet effet est le résultat du laminage de la vapeur à travers les étranglements dans les conduites et les lumières; tel est le cas du diagramme IV. Le diagramme I marque un crochet en C, tandis que IV est tellement arrondi en ce point qu'il est impossible de préciser à quel moment se fait la détente : les machines à déclic et à fermeture instantanée donnent généralement la première figure, tandis que les machines à tiroir ont un diagramme plus voisin de la seconde figure. De longues conduites, des conduites coudées et des lumières trop étroites donnent encore le diagramme IV.

Nous avons déjà dit que la détente de la vapeur devait se faire suivant une hyperbole répondant à la formule $pv^{\mu} =$ constante, μ étant égal à 1,035 quand la vapeur est sèche et à $1,035 + 0,1\,x$, quand le mélange renferme une proportion x de vapeur[1]. Mais en pratique la courbe est toujours supérieure à cette courbe théorique ; nous avons expliqué ce résultat en l'attribuant à l'action des parois sur l'eau de condensation produite durant l'admission : sur le diagramme V, CD, est la courbe réelle, CD′, la courbe de Mariotte ($pv =$ constante) et CD″ la courbe théorique. Ces différences sont plus accentuées dans les cylindres pourvus d'une enve-

1 Voyez ci-dessus, p. 29.

loppe. Si la courbe réelle était au-dessous de la ligne de Mariotte, il faudrait conclure à un défaut d'étanchéité du piston : une fuite au tiroir d'admission pourrait compenser cet effet.

L'avance à l'échappement ne doit pas être trop prononcée : elle dépend de la vitesse du piston, des proportions des lumières et des résistances présentées à l'écoulement de la vapeur par les canalisations plus ou moins coudées. Elle est bien en I, excessive en IV, nulle en V ; en III, il y a un retard nuisible, puisqu'il augmente la contrepression.

Au commencement de la course rétrograde du piston, la pression qui s'exerce sur le piston doit tomber le plus tôt possible à sa valeur minimum ; de plus, la contrepression doit être réduite au minimum.

La compression a lieu suivant FA, aussitôt que l'échappement se forme et avant que le piston n'ait terminé sa course arrière : elle se fait généralement suivant la loi de Mariotte. La surface du diagramme représentant le travail disponible sur le piston, il est évident que la compression, qui réduit cette surface, diminue aussi ce travail ; mais ce désavantage disparaît dans une machine dont les espaces nuisibles ont une certaine importance ; de plus, il est compensé dans les machines à allure rapide, car il donne une grande douceur à leur marche et supprime les chocs. Néanmoins il ne faut pas abuser de ce moyen.

Enfin, les diagrammes peuvent donner lieu à des mesures utiles. Dans une machine bien conditionnée, la pression au cylindre doit être presque égale à celle de la chaudière et la contrepression ne doit guère dépasser la pression du condenseur ou de l'atmosphère. La différence entre la pression à la chaudière et au cylindre est estimée à 7 ou 8 pour 100, 10 tout au plus ; l'excès de contrepression sera d'autre part de 1/10 d'atmosphère environ. Si le diagramme indique des écarts plus considérables, il y aura lieu de modifier les canalisations d'accès et de dégagement de la vapeur.

Les considérations qui précèdent nous fournissent une base solide d'appréciation pour une distribution de machine existante : nous allons voir maintenant comment on peut étudier un projet de distribution ; mais d'abord il convient de faire connaître exactement le mode de fonctionnement des tiroirs.

II. **Fonction du tiroir simple.** — Les organes de la distribution étaient d'abord des soupapes, que des mécanismes appropriés ouvraient et fermaient à temps voulu ; on abandonna plus tard les soupapes, pour les remplacer par un organe unique, le *tiroir à coquille*, dont le simple déplacement suffisait pour distribuer la vapeur et opérer sa décharge dans les conditions recherchées par l'ingénieur : aujourd'hui on revient à l'emploi des soupapes et des robinets multiples, en faisant preuve peut-être d'un engouement excessif pour ce genre de mécanismes, trop souvent compliqués et délicats.

Mais le tiroir restera toujours l'organe de distribution par excellence : aussi consacrerons-nous à son étude un nombre de pages suffisant pour bien faire comprendre sa fonction et son fonctionnement.

Le tiroir consiste essentiellement en une plaque métallique, dressée et polie sur une de ses faces, glissant sur une plaque en fonte également dressée et polie, où aboutissent trois conduits, dont deux vont aux extrémités du cylindre, tandis que le troisième débouche dans le condenseur ou bien à l'atmosphère : ce tiroir est animé d'un mouvement rectiligne alternatif continu. La plaque dressée est recouverte d'une boîte à vapeur, mise directement en communication avec le générateur de vapeur ; le tiroir, dans quelque position qu'il soit, doit toujours intercepter la communication entre la chaudière et le condenseur ; tour à tour, il démasquera l'une ou l'autre des *lumières* des conduits, de manière à faire presser la vapeur sur l'une ou l'autre face du piston, tandis que la seconde lumière sera mise en communication avec

l'ouverture qui aboutit au condenseur. Ces lumières sont rectangulaires, allongées, parallèles, et percées l'une près de l'autre ; elles ont même longueur dans le sens perpendiculaire au mouvement du tiroir. Les deux lumières extrêmes relient la glace de distribution aux extrémités opposées du cylindre; l'ouverture intermédiaire débouche dans un tuyau qui va au condenseur.

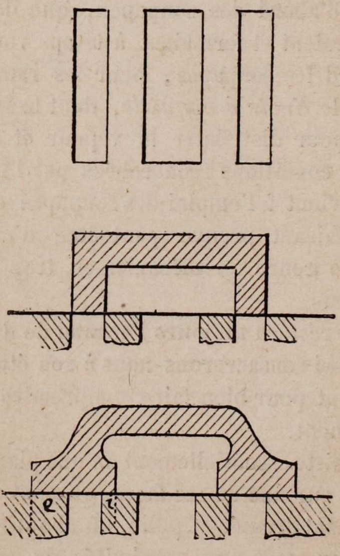


Fig. 11. — Tiroir à coquille.

Le tiroir, évidé en forme de coquille, porte sur la glace par ses rebords : le creux intérieur a la forme d'un rectangle, dont un des côtés est de la longueur commune des lumières, tandis que l'autre côté a une longueur égale à l'intervalle séparant les orifices extrêmes (fig. 11). Il résulte de là que, dans la position moyenne du tiroir, le creux du tiroir recouvre la totalité des espaces pleins qui séparent la lumière de décharge des lumières d'admission, tandis que ces dernières sont masquées et obturées par les

rebords pleins du tiroir, qui doivent être assez larges pour cela : tel serait un tiroir sans recouvrement. Mais ce tiroir ne permettrait pas de réaliser de détente, nous allons le prouver ; aussi lui donne-t-on un recouvrement intérieur *i* et extérieur *e*. On appelle *recouvrement intérieur* la largeur toujours petite, dont les rebords pleins de tiroir dépassent les bords internes des lumières, en appuyant sur les bandes de fonte qui les séparent ; le *recouvrement extérieur* est constitué par l'excès de largeur des parties du tiroir sur les bords externes des lumières. C'est Clapeyron qui a découvert que les recouvrements permettent de faire de la détente.

Pour nous en rendre compte, suivons le mouvement d'un tiroir. Nous voyons que, si le tiroir n'a pas de recouvrement, le moindre déplacement vers la droite démasquera la lumière d'admission de gauche A, tandis que le moindre mouvement vers la gauche fera communiquer cette lumière avec la décharge. Faisons marcher le tiroir vers la gauche d'un mouvement continu ; le rebord extérieur ferme la lumière A, mais en même temps le rebord intérieur ouvre cette lumière vers le condenseur ; la décharge succède donc immédiatement à l'admission, et il n'y a évidemment pas de détente possible. Au contraire, dans le tiroir à recouvrement, le rebord extérieur ayant fermé la lumière A, la largeur du patin fait que cette lumière reste obturée quelque temps et la durée de cette fermeture est proportionnelle à la largeur de ce patin ; c'est la durée de la détente. Le tiroir à recouvrement de Clapeyron est donc un appareil de détente.

Nous allons analyser par le détail les phases successives d'une distribution par tiroir à recouvrement, en faisant glisser continûment le tiroir sur la glace : la figure 12 permettra sans peine au lecteur de se rendre compte des faits ; supposons d'abord le piston à l'extrémité gauche du cylindre et sur le point de rétrograder ; à ce moment, le tiroir est sur la droite de sa position moyenne. La lumière A est déjà

ouverte, puisqu'il faut que la vapeur vienne presser sur le piston et l'accompagne dans sa progression; il est nécessaire qu'elle s'ouvre de plus en plus, pour faciliter l'accès de la

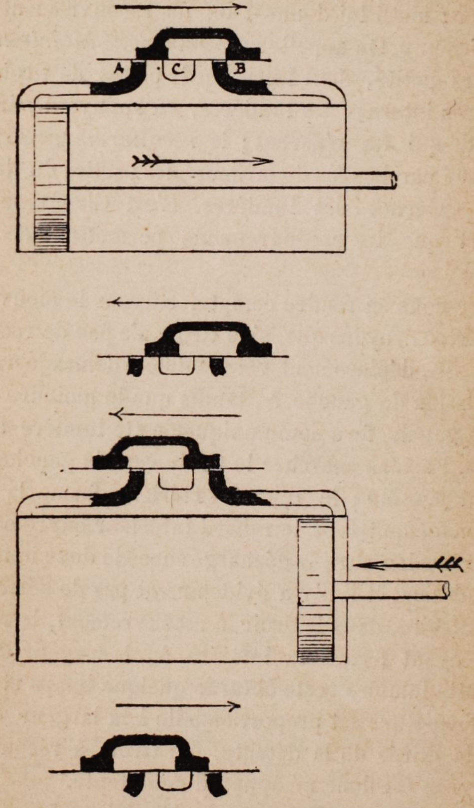


Fig. 12. — Phases de la distribution.

vapeur et découvrir toute la lumière, ce qui exige que le tiroir marche vers la droite. Dans cette position du tiroir, le creux de la coquille enjambe sur les lumières C et B; la vapeur s'écoule donc de la droite du cylindre vers le condenseur.

Quand toute la lumière A sera découverte, le tiroir aura atteint la limite extrême de son excursion vers la droite : il reviendra alors sur ses pas pour fermer l'accès de la vapeur et commencer la détente du fluide admis. Voilà donc maintenant que le tiroir marche en sens inverse du piston.

Remarquons que l'orifice d'admission A est entièrement fermé alors que B est encore ouvert; c'est que, en effet, la vapeur ne doit pas être gênée dans son écoulement hors du cylindre, sinon elle exercerait une contrepression nuisible.

Le tiroir, continuant son mouvement, traverse sa position moyenne et la détente dure pendant tout le temps que le patin de gauche met à glisser sur la lumière A ; mais le rebord intérieur vient enfin à fleur du bord intérieur de cette lumière et aussitôt la détente cesse, l'échappement de la vapeur commence; cependant le piston n'est pas encore arrivé à l'extrémité de sa courbe vers la droite, de telle sorte que l'échappement s'est trouvé anticipé. L'ouverture A restera ouverte dans le tiroir pendant la plus grande partie du temps que le piston mettra à revenir en arrière.

Cependant, quand le tiroir aura atteint l'extrémité de sa course, il faudra qu'il intervertisse son mouvement pour mettre fin à la décharge; il commencera à fermer la lumière A. Pendant tout le temps que le piston glissera sur cette lumière, la décharge sera supprimée, alors même que le piston continuera d'avancer vers l'extrémité de gauche du cylindre; il en résultera une compression de la vapeur restée dans le cylindre; puis, l'admission se fera de nouveau, et nous reprendrons la série des opérations que nous venons de décrire.

Il ressort évidemment de ce qui précède que la détente et la compression sont d'autant plus longues que le patin du tiroir est plus large, c'est-à-dire que le recouvrement est plus considérable; du même coup, la durée de l'admission est diminuée suivant la même proportion.

Mais nous n'avons pas encore parlé des *avances ;* pour faciliter et adoucir le mouvement du piston, on a reconnu l'utilité d'admettre la vapeur sur le piston un instant avant qu'il ne commence sa course rétrograde et de faire de l'échappement un instant avant qu'il ne prenne le mouvement inverse. Cette anticipation de l'admission et de l'échappement s'obtient en hâtant un peu les mouvements du tiroir ; le recouvrement extérieur démasquera donc la lumière d'admission avant que le piston ne soit à fond de sa course ; le recouvrement intérieur démasquera la lumière opposée avant que le piston n'ait achevé sa course.

Voyons maintenant par quel moyen nous donnerons au tiroir les déplacements nécessaires pour réaliser toutes les phases que nous venons d'analyser.

Le mouvement du tiroir est obtenu automatiquement par le moyen d'une simple manivelle, ou, ce qui revient au même, par un excentrique circulaire : c'est le dispositif qui est employé le plus souvent. La distance du centre de l'excentrique à l'axe de l'arbre constitue l'*excentricité ;* c'est l'équivalent du rayon d'une manivelle. Le mouvement obtenu par la conduite de cet excentrique est évidemment un mouvement alternatif : le tiroir oscillera donc périodiquement autour de sa position moyenne. Or, nous avons démontré par l'étude de la figure 9, que le tiroir devrait être à sa position moyenne au moment où le piston serait au voisinage du fond de course, c'est-à-dire à son point mort; il en résulte que la direction de la manivelle ou de la ligne des centres de l'excentrique doit être calée à angle droit sur la direction de la manivelle motrice : voilà un premier point à noter. Mais nous avons vu de plus qu'il y avait lieu d'anticiper légèrement sur l'admission et sur la décharge; la direction de la ligne des centres sera donc légèrement portée en avant, ou bien, en d'autres termes, l'angle de calage sera plus grand qu'un angle droit dans le sens du mouvement, soit $\frac{\pi}{2} + \delta$;

cet angle δ s'appelle l'*angle d'avance* ou l'*avance angulaire*.

Le rayon d'excentricité r est très petit relativement au rayon R de la manivelle; il suffit que la demi-course du tiroir soit égale à la somme du recouvrement extérieur e et de la largeur a de la lumière d'admission pour que cette lumière puisse être entièrement démasquée; le rayon d'excentricité r sera donc généralement égal à $e + a$. Les dimensions les plus usuelles sont les suivantes :

$$r = \frac{4}{3} a$$

$$e = \frac{1}{4} a$$

$$i = \frac{1}{20} a$$

Mais ces dimensions ne sont nullement arbitraires, car ce sont les éléments qui déterminent la grandeur de la détente et la succession des diverses phases de la distribution. Aussi faut-il les calculer avec soin pour ne rien laisser au hasard et réaliser le diagramme que l'on veut; l'étude de cette importante question fera l'objet du paragraphe suivant.

III. **Epure de Zeuner**. — Les épures de distribution ont pour objet de permettre d'établir rigoureusement et à l'avance les dimensions des lumières, des recouvrements, et de l'angle d'avance d'une distribution par tiroir.

Autrefois, les constructeurs obtenaient ce résultat par une série de tâtonnements et d'essais faits sur la machine construite; ce procédé empirique était absolument défectueux. Aujourd'hui l'on emploie des constructions graphiques, effectuées sur les indications de la théorie : c'est le procédé rationnel. Nous n'avons pas à démontrer que c'est la seule bonne manière d'opérer.

Nous avions à choisir entre l'épure de M. de Fréminville, en coordonnées rectilignes, que ce savant ingénieur avait enseignée dans son cours de l'École Centrale, et entre

l'épure de M. Zeuner, en coordonnées polaires, employée plus fréquemment, parce qu'elle a été magistalement présenté dans le *Traité des distributions par tiroir* [1] du célèbre professeur de l'École polytechnique du Zurich. Cette dernière méthode est assurement plus connue que la première; c'est là un argument sérieux qui nous a déterminés à donner la préférence à l'épure de Zeuner.

La base de cette méthode est essentiellement théorique : nous nous contenterons néanmoins d'exposer la pratique du procédé, en essayant toutefois de la justifier par quelques considérations cinématiques.

Prenons une machine horizontale, dans laquelle le piston est relié directement à la manivelle par une bielle, l'axe de la tige du piston passant par le centre de l'arbre de couche ; le tiroir est mené par un excentrique, à l'aide d'une tringle de grande longueur par rapport à l'excentricité r; nous admettrons que la glace du tiroir soit renfermée dans le plan même de l'excentrique. Appelons, comme ci-dessus, $\frac{\pi}{2} + \delta$ l'angle de calage de l'excentrique avec la manivelle ; δ est l'angle d'avance. Convenons de négliger l'influence de l'obliquité variable de la bielle et de la tringle : cela revient à supposer leur longueur infinie. Nous nous proposons de trouver les positions simultanées du piston et du tiroir : c'est facile analytiquement, mais le cadre très restreint de cet ouvrage nous défend d'entrer dans ce genre de recherches et nous devons nous borner à justifier la méthode de Zeuner. Pour cela nous allons recourir à un relevé expérimental très facile à décrire et à concevoir. Attachons un crayon à l'extrémité de la tringle qui mène le tiroir : amenons ce tiroir dans sa position moyenne. Disposons, en face du crayon, un disque de carton, pouvant tourner sur un pivot, coïncidant

[1] Nous nous en référons à la traduction de MM. Debize et Mérijot, Paris, 1869, Dunod.

avec cette position moyenne du tiroir : à l'aide d'une corde et d'une poulie à gorge, il sera aisé de donner au disque une vitesse angulaire constamment égale à celle de la manivelle motrice de la machine. Cela posé, faisons tourner la machine ; le crayon tracera sur le disque de carton une courbe, dont les rayons vecteurs donneront précisément les écarts du tiroir par rapport à sa position moyenne en fonction du mouvement de la manivelle. Si nous pouvions tracer exactement cette courbe, le problème serait résolu.

Elle affecte la forme d'un 8.

Théoriquement, elle devrait être formée de cercles, tangents en O ayant un rayon égal à $\frac{r}{2}$, c'est-à-dire égal à la moitié de l'excentricité, dont la ligne des centres COC′ ferait avec $o\,y$ un angle δ, pris en sens inverse du mouvement, représenté par une flèche (fig. 13). L'axe OX est la direction de la manivelle correspondante aux points morts. Cette figure est, en coordonnées polaires, l'épure qui donne, pour toute position de la manivelle, la distance du tiroir de sa position moyenne, puisque le centre O de la figure correspond à cette position moyenne ; le rayon vecteur OP, par exemple, donne à l'échelle du dessin, l'écart du tiroir quand la manivelle est en OQ. Quelle est alors la position du piston ? Pour le savoir, il n'y a qu'à projeter Q sur la droite XX, qui représente l'axe du cylindre.

Cette épure donne une solution complète du problème de la distribution par tiroir.

En effet, avec les rayons OA $= e$ (recouvrement extérieur), OB $= i$ (recouvrement intérieur), décrivons deux cercles du point O comme centre. Menons le rayon vecteur OP, correspondant à la position Q de la manivelle et R du piston ; la partie AP comprise entre le cercle du recouvrement extérieur et le cercle du tiroir, dont le centre est en C, est la quantité dont la lumière d'admission est ouverte. Nous pourrons suivre aisément sur la figure tous les mouvements

du tiroir et analyser sans peine toutes les phases de la distribution, ainsi que nous allons le démontrer.

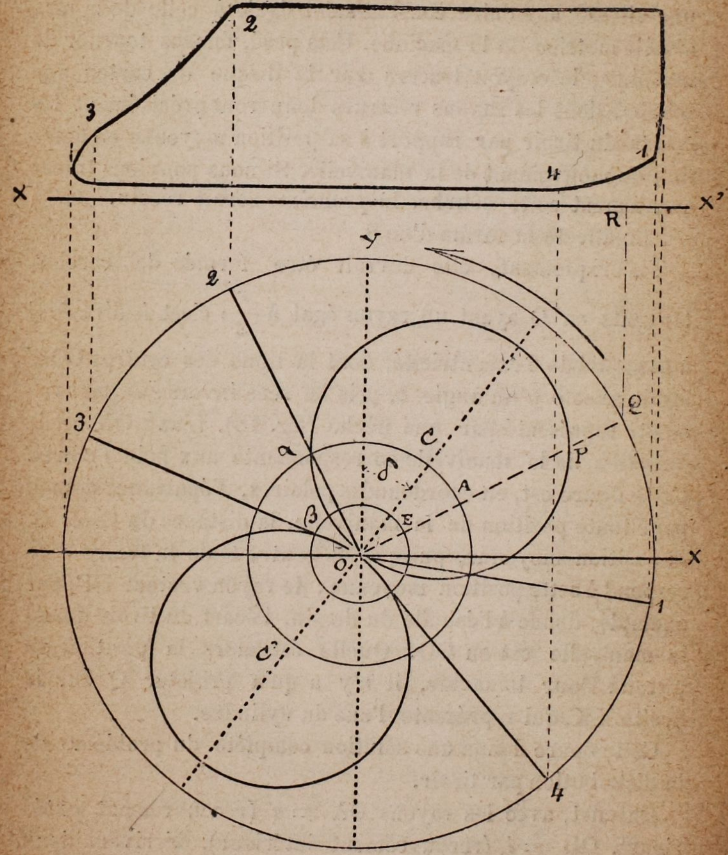


Fig. 13. — Epure de Zeuner.

Et d'abord, l'intersection des cercles OA et OC donne le moment de l'ouverture anticipée et de la lumière d'admission, par le rayon vecteur 01 ; 02 correspond à la fermeture de ladite lumière, c'est-à-dire au commencement de la

détente. Tout à coup, sur 03, intersection des cercles OF et OC, la lumière est découverte à l'extérieur de la coquille, vers le conduit de décharge : c'est l'échappement anticipé. Puis, la décharge se prolonge pendant que le piston recule ; sur 04, l'échappement se ferme et il se produit de la compression ; enfin en 01, l'admission a lieu de nouveau. En projetant les points 1, 2, 3 et 4 sur XX′, nous trouvons les positions simultanées du piston, et nous pouvons construire le diagramme inscrit au haut de la figure.

L'épure de Zeuner permet donc de suivre aisément les opérations du cycle, telles que les donne un tiroir existant ; mais elle est plus utile encore pour faire l'étude d'une distribution à réaliser en vue d'un diagramme proposé. Nombreux sont les problèmes qu'on peut résoudre par ce procédé : l'exemple suivant en témoignera mieux que toutes les explications que nous essaierions d'en fournir.

Problème. — On se propose d'établir une distribution par tiroir avec un excentrique de rayon r et un angle d'avance $\delta = 30°$: l'admission de la vapeur doit se produire pendant les 8 dixièmes de la course du piston, et l'échappement doit commencer lorsque le piston aura encore à parcourir 4 centièmes de la course ; on demande de déterminer les recouvrements intérieur e et extérieur i et le maximum d'ouverture des lumières.

La solution est d'une grande simplicité : nous ferons un angle CoY $= 30°$ sur OY et prendrons OC $= \frac{r}{2}$, ce qui nous permet de tracer les deux cercles du tiroir. Cela fait, décrivons à une échelle quelconque le cercle OX de la manivelle et nous marquerons sur XX′ les ordonnées qui correspondent aux points 2 et 3 : nous pourrons mener ainsi les rayons 02 et 03, et déterminer par α et β les rayons des cercles OA et OE, ce qui nous fournit les recouvrements e et i cherchés.

Tous les problèmes se traitent de même et avec non moins de facilité.

Il ne sera sans doute point inutile de consigner ici quelques données pratiques qui serviront de guide à ceux qui voudraient étudier plus complètement cette question. L'excentricité r est généralement comprise entre 50 et 80 millimètres, l'angle d'avance δ entre 10° et 30° ; la largeur des orifices a, mesurée dans le sens du mouvement, varie de 80 à 50 millimètres, suivant la puissance des machines. La cloison, qui sépare les lumières, et dont nous noterons l'épaisseur par b, se détermine par la formule $b = 10 + 0,5 . a$ millimètres.

IV. **Distributions par deux tiroirs.** — L'étude d'une distribution par tiroir simple nous a permis d'observer que ce système ne se prête pas bien aux grandes détentes ; il faudrait, en effet, pour pouvoir réaliser de semblables détentes, recourir à des avances angulaires énormes, ce qui entraînerait une forte compression et une grande réduction des orifices d'admission. Le tiroir simple permet à peine une introduction avec 4 dixièmes et c'est au prix de sérieuses difficultés, surtout dans les machines à changement de marche.

Gonzenbach chercha à corriger ce défaut de la distribution par tiroir en employant un second tiroir pour faire la détente, indépendamment du tiroir principal, donc sans exagérer du même coup la compression. Voici comment il a disposé ses deux tiroirs. Le premier, qui est un simple tiroir à coquille, à faible recouvrement, glisse comme d'ordinaire sur la glace des lumières et effectue la distribution presque sans détente ; le second, qui est une simple plaque de fonte percée d'un trou, s'appuie sur un diaphragme plat, disposé en travers de la chambre de vapeur, et percé lui-même d'une ouverture, que la vapeur doit traverser nécessairement pour pénétrer dans le cylindre. Que ce second tiroir vienne obturer l'ouverture pratiquée dans le diaphragme, et aussitôt

l'admission cesse et la détente commence : c'est par conséquent le second tiroir qui opère la détente, mais sa fonction est limitée à cela. Le premier tiroir sera commandé par un excentrique à faible avance, le second par un autre excentrique calé de telle façon que l'obturation de l'orifice du diaphragme ait lieu au moment voulu. Le dispositif est très simple et peu coûteux et il permet d'allonger la détente tant qu'on veut. Il convient fort bien aux machines Compound, dans lesquelles on commence la détente dans le petit cylindre à haute pression : un tiroir ordinaire donnerait généralement une admission trop longue.

Le diaphragme intermédiaire peut être supprimé sans inconvénient, si l'on se résout à faire glisser la plaque de détente sur le dos même du premier tiroir. Ce tiroir devra alors être d'une forme particulière ; en outre de la coquille, il présentera de chaque côté un conduit, qui le traversera de part en part, débouchant en bas sur la glace aux lumières, et faisant lui-même par dessus l'office de lumière; l'obturation par la plaque se fera donc par la partie supérieure du tiroir. On voit un semblable tiroir dans le dessin ci-contre représentant une détente Meyer.

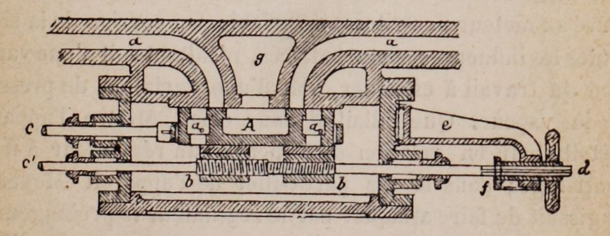


Fig. 14. — Détente Meyer.

Meyer à eu l'idée de couper en deux la plaque de détente que nous venons de décrire : il a trouvé ainsi le moyen de modifier simplement le degré de détente, à la volonté du mécanicien chargé de la conduite de la machine. Ce dispositif est facile à suivre sur la figure 14 ; nous y voyons d'abord

le tiroir, dont la coquille est en A, et les deux lumières en *a o ; c* est la tige de commande de ce tiroir. Les deux parties de la plaque sont marquées en *b ;* chacune d'elles porte deux logements cylindriques, dans lesquels s'engagent à frottement deux bagues munies d'épaulements, qui entraînent les obturateurs tout en leur laissant la liberté de s'appliquer hermétiquement sur la glace. Une tige à double filet droit et gauche traverse ces bagues ; une rotation de cette tige a donc pour effet de rapprocher ou d'éloigner les deux pièces l'une de l'autre : c'est ainsi que l'on fait varier la détente.

Cette tige traverse les deux cotés de la boîte à vapeur ; elle est reliée à son exentrique par *c' ;* l'autre bout est muni d'un volant, qui n'entrave en rien son mouvement de translation et permet de lui imposer un mouvement de rotation.

Le dispositif Meyer a non seulement l'avantage de permettre une variation de détente à la main, mais il rend même possible un réglage de la détente par le régulateur. Il y a longtemps qu'on cherche à gouverner de la sorte automatiquement la détente; c'est en effet l'idéal, quand l'introduction de la vapeur au cylindre, et par suite le travail de la machine, suit exactement les oscillations du travail résistant et conserve au moteur une vitesse invariable. On corrige de la sorte toutes les influences perturbatrices, résultant soit d'une variation du travail à effectuer, soit d'une variation de pression de la vapeur. Que fallait-il pour cela? Mettre l'appareil distributeur en relation directe avec un régulateur à force centrifuge; dans le cas particulier de l'appareil Meyer, il s'agissait de faire attaquer par le régulateur le prolongement de la tige filetée de détente. Ce mouvement provoque, il est vrai, une assez grande résistance et l'on peut nuire ainsi à la stabilité du régulateur, qui n'est généralement pas fait pour développer un tel travail : néanmoins les mécaniciens ont su tourner cette difficulté. Signalons entre autres le dispositif Claudius Jouffray, dans lequel le manchon du régulateur porte une crémaillère commandant un pignon monté sur la tige

filetée ; pour soulager le régulateur, MM. Brénier et Cie ont commandé la vis par la machine elle-même, le régulateur

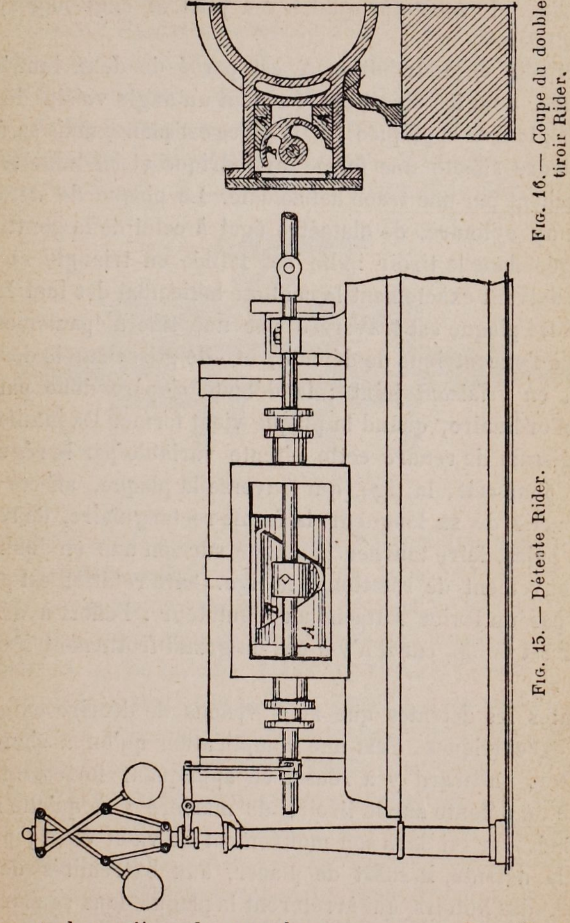


Fig. 15. — Détente Rider.

Fig. 16. — Coupe du double tiroir Rider.

n'ayant plus qu'à embrayer dans un sens ou dans l'autre les organes de commande ; mais nous devons à Rider une solution meilleure, que nous allons décrire avec soin [1].

[1] Cette détente est aussi connue sous le nom de Hayward.

Elle est représentée par les figures 15 et 16 : la première montre l'appareil de face, la seconde le fait voir en coupe ; il est facile de constater qu'il n'y a plus ni engrenages, ni crémaillères.

Le tiroir de distribution A est percé de deux lumières obliques, dont les directions forment un angle voisin de 45 degrés ; la face appliquée sur la glace est plane, mais sa face supérieure affecte une forme cylindrique et les lumières y débouchent par une trace hélicoïdale. La plaque de détente B est un cylindre, de diamètre égal à celui de la gouttière ménagée dans le tiroir : elle est taillée en triangle et ses bords suivent exactement le contour hélicoïdal des lumières. Or, cette plaque est traversée par une tige à épaulements, reliée à l'excentrique de détente, et elle glisse sur le dos du tiroir, en y faisant joint : la détente s'opère donc par le moyen ordinaire, quand la plaque vient fermer les lumières. Il s'agissait de rendre cette détente variable par le régulateur ; pour cela, la tige, qui traverse la plaque, affecte sur une partie de sa longueur la forme rectangulaire, de sorte qu'on puisse faire tourner la plaque sur son axe en donnant un mouvement de rotation à la tige. Cette rotation est produite par un levier rattaché au régulateur : l'effort à développer est faible, car il n'y a pas de grand frottement à surmonter.

Toutes les détentes que nous venons de décrire exigent deux excentriques : c'est une complication qu'on a cherché à éviter. Edward y a réussi en appliquant fortement la plaque de détente sur le tiroir, de manière à ce qu'elle soit entraînée par lui dans son mouvement de va et vient ; pour faire la détente, il suffit de placer, aux extrémités de sa course, des butoirs qui arrêteront la plaque dans sa marche et la déplaceront par rapport au tiroir : Thomas et Laurens rendirent la détente variable en coupant la plaque en deux et en disposant entre elles un coin, qu'il fallait déplacer pour règler à volonté la fermeture des lumières ; Farcot perfec-

tionna ce dispositif en remplaçant le coin par une came et cet appareil a acquis une grande célébrité, parce qu'il donne d'excellents résultats.

La détente Farcot se compose d'un tiroir ordinaire, percé de deux lumières *b* (fig. 17) ; ces lumières s'évasent par le haut et elles forment sur le dessus des ouvertures grillées *d*, *e*, *f*, légèrement espacées entre elles. Sur ce tiroir en glisse un autre, qui est grillagé aussi, et qui joue le rôle de plaque de détente : il porte des butoirs *r* et *j* intérieurs, et *t*

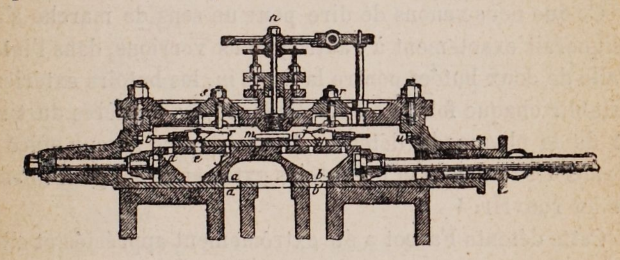


Fig. 17. — Détente Farcot.

extérieurs ; la pression de la vapeur l'applique sur le tiroir principal avec assez de force pour qu'il soit obligé de le suivre par entraînement quand le premier se met en mouvement. Or, une came *m* est disposée entre les deux butoirs intérieurs, et les butoirs extérieurs viennent heurter contre les parois latérales de la boîte à vapeur ; il en résulte que le mouvement de la plaque de détente est limité à une excursion dont l'amplitude peut varier avec la position de la came *m*. Cette came a une forme circulaire excentrée, ou bien celle d'une développante de cercle ; elle peut se tourner à la main, mais le plus souvent on la relie au régulateur.

Cela posé, nous pouvons nous rendre compte facilement du fonctionnement du double tiroir Farcot ; supposons que le tiroir principal, conduit par son excentrique, aille de gauche à droite (fig. 17), nous voyons que l'admission *b'* est encore libre, mais que la grille supérieure est couverte par la

plaque de détente, ce qui supprime toute entrée de vapeur et produit la détente; d'autre part, l'échappement se fait par a. Mais le tiroir principal va bientôt ouvrir la lumière a'; la vapeur traversera $d\ e\ j$ et pénétrera dans le cylindre, aussi longtemps que les ouvertures de la plaque de détente correspondront avec les ouvertures du tiroir. Tout à coup r butera contre la came m; la plaque restera en place tandis que le tiroir continuera d'avancer, et la grille supérieure sera fermée ; c'est le moment où commence la détente.

Ce que nous venons de dire pour un sens de marche s'appliquerait exactement à l'autre ; nous verrions, dans l'intervalle de deux butées contre la came m, les butoirs extérieurs rétablir chaque fois la correspondance des lumières du tiroir et de la plaque de détente. Ainsi la came a pour office de fermer les lumières et les butoirs extérieurs ont pour mission de les rouvrir.

Cette détente Farcot a été extrêmement appréciée et elle a été presque uniquement employée pendant de longues années ; elle a permis de réduire sensiblement la consommation des machines tout en augmentant leur régularité; on en fait encore fréquemment usage aujourd'hui. Son seul défaut était d'être un peu compliquée ; mais on n'avait guère à regretter cet inconvénient, puisqu'on réalisait d'autre part, sur le dispositif de Meyer, l'économie d'un excentrique. En somme, la détente Farcot a marqué une époque dans l'histoire de la machine à vapeur.

V. **Distribution par coulisse.** — On appelle *coulisse* une pièce courbe en fer, creusée suivant son axe, et recevant dans son évidement un bouton, nommé *coulisseau*, qui est rattaché au tiroir; Stephenson a inventé cet appareil dans le but de permettre le changement de marche des machines. Nous ne nous occuperons point de cette fonction, qui ne trouve guère d'application dans les machines fixes de l'industrie et dont l'emploi est limité aux machines d'extraction, aux locomotives et aux machines de bateau. Mais la cou-

lisse permet aussi de modifier la détente, et cette étude rentre dès lors dans le cadre de ce travail.

La coulisse de Pius Finck est le type de ce genre d'appareils de détente ; son brevet remonte à l'année 1857.

L'excentrique de Finck est venu d'une pièce avec la coulisse (fig. 18) ; il est attaché par une bielle courte au point fixe *c*, de telle sorte que ses divers points prennent un mouvement alternatif autour de ce centre ; le coulisseau *d* participe à ce mouvement, et il le transmet au tiroir *s* par une série de tringles et de leviers.

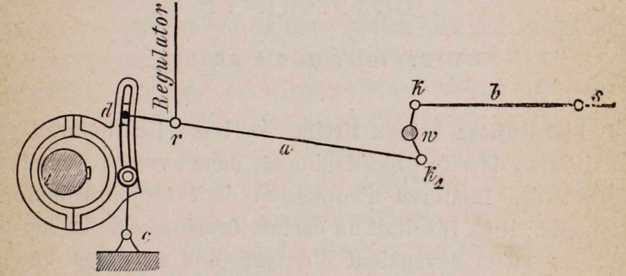


Fig. 18 — Coulisse de Pius Finck.

L'amplitude de ce mouvement dépend de la position du coulisseau dans la coulisse ; elle est maximum quand *d* est à la partie supérieure de l'appareil. Le calage de l'excentrique correspond à un angle d'avance égal à 90 degrés ; mais cet angle croît quand *d* s'élève, et c'est ainsi que varie la détente.

Les déplacements du bouton sont opérés par le régulateur lui-même, agissant en *r*.

C'est la distribution par coulisse la plus simple qu'on puisse imaginer et son usage est par cela même très répandu. MM. Allen et Porter l'on appliquée très judicieusement et avec un plein succès dans leur belle machine à grande vitesse.

Ce mode de tiroir a été appliqué à la conduite de la plaque

de détente dans les distributions à deux tiroirs ; telles sont les détentes Duvergier et Bréval : cette dernière est connue sous le nom de M. Febvre qui la construit à Lyon.

CHAPITRE VI

DISTRIBUTIONS A DÉCLIC

I. **Distributions à deux tiroirs.** — Dans les appareils de distribution décrits précédemment, nous avons vu que l'ouverture des lumières d'admission était toujours lente et graduelle ; il en résultait un certain *laminage* de la vapeur, dont les effets devenaient d'autant plus sensibles que la vitesse du piston était plus grande. D'autre part, la longueur de la détente était limitée et il était assez difficile d'en faire varier l'étendue par le régulateur ; or, il importe à la bonne marche de la machine et à son rendement que le travail moteur suive toutes les variations du travail résistant, et l'on réalise le mieux possible cette condition en détendant la vapeur des 4 aux 8 dixièmes, suivant les besoins. Les constructeurs furent amenés ainsi à imaginer des dispositifs ingénieux pour opérer des ouvertures et des fermetures des lumières instantanées, et de les placer sous la dépendance directe du régulateur.

A cet effet, ils combinaient des tiroirs à avance constante à l'admission, et des plaques de détente, conduites par des leviers, donnant des mouvements extrêmement rapides et suspendant brusquement l'admission, au moment voulu, par l'action du régulateur sur un déclic à ressort ou à réaction. Nombreux sont les dispositifs adoptés dans ce but ; nous n'en décrirons qu'un fort petit nombre, qui sont devenus pour ainsi dire classiques.

Parmi ce genre de déclics, nous devons une mention particulière à la détente Correy, qui s'applique fort bien aux machines Compound à balancier, si recherchées dans la filature, parce qu'elles y donnent des résultats excellents ; ce type a été construit longtemps par la maison Powel, de Rouen, et il a permis de réaliser à la fois une grande régularité d'allure et une sérieuse réduction de consommation. La détente Correy présente quelque analogie avec la détente Meyer, en ce sens que la distribution est opérée par deux tiroirs superposés, commandés par des excentriques distincts; le tiroir de détente est aussi formé de deux plaques, qui viennent obturer les lumières percées dans le tiroir inférieur de distribution. Mais le mouvement des plaques est obtenu par des moyens nouveaux, qui constituent l'originalité du système Correy, et que nous allons décrire brièvement.

Les deux plaques sont indépendantes l'une de l'autre et elles sont animées de mouvements indépendants ; mais la disposition des mécanismes étant identique, il suffira de nous occuper de l'un d'eux. Chaque plaque de détente est actionnée par un excentrique, qui lui donne un mouvement oscillatoire, comme dans la détente Meyer; seulement la tige de commande est coupée par un déclic, qui libère à un certain moment la plaque de son excentrique ; elle retombe alors, en vertu du poids considérable des pièces qui la composent, et elle ferme la lumière d'admission.

Voyons comment et quand cette libération s'opère :

La tige de commande de la plaque de détente se rattache à la tringle de l'excentrique par un manchon de liaison, dans lequel un taquet à ressort repose sur un épaulement de la tige; tant que ce taquet n'est pas repoussé, la tringle, le manchon et la tige sont solidaires. Or, ce taquet est sous la dépendance d'un levier coudé, porté par le manchon lui-même, et muni à une de ses extrémité d'un butoir ; ce levier partage donc le mouvement oscillatoire du manchon. Mais en face du butoir est disposée une came ; supposons que le butoir

vienne la toucher; aussitôt le levier oscille, son bras rejoint le taquet dans son logement, celui-ci se dérobe et abandonne l'épaulement de la tige, laquelle retombe aussitôt parce que la liaison est rompue; c'est à ce moment-là que s'opère la fermeture de la lumière d'admission. Le choc est amorti par un *dashpot* analogue à celui des machines Corliss. Mais la tringle de l'excentrique a continué son mouvement, alors même que la tige ne l'accompagnait plus; après avoir achevé sa course, elle redescend et l'épaulement repasse devant le taquet, lequel, repoussé par son ressort, reprend sa place et rétablit la solidarité de l'ensemble. On voit donc sans peine que la durée de l'admission et, par suite, la grandeur de la détente, dépend uniquement de la position de la came, qui, en refoulant le butoir, permet à la plaque de détente de retomber ; cette came est elle-même orientée dans la direction voulue par le régulateur.

La détente Correy présente une grande sensibilité et elle est en somme fort simple, n'exigeant ni ressorts de rappel, ni aucun organe compliqué. On ne l'applique que sur le petit cylindre des Woolf ou des Compound à balancier : elle permet de faire varier l'admission de 0 aux 8 dixièmes de la course du cylindre à haute pression ; ce sont des limites extrêmement larges.

On a aussi appliqué ce dispositif avec une plaque unique, comme dans la distribution Gonzenbach ; les résultats sont bons encore, mais alors la détente est nécessairement moins étendue.

MM. Baudet et Boire, de Lille, ont transformé la détente Farcot dans le même ordre d'idées : au lieu d'entraîner les plaques de détente par le frottement, ils les manœuvrent par l'intermédiaire de déclics. A cet effet, la boîte de vapeur a été coupée en deux parties, disposées symétriquement par rapport à l'axe transversal du tiroir ; le tiroir principal est divisé lui aussi en deux pièces distinctes, de sorte qu'il y a un tiroir à chaque extrémité du cylindre, en face même des

lumières. Une tige unique commande ces tiroirs et leur communique le mouvement de va-et-vient donné par l'excentrique ; mais, en traversant l'intervalle des deux boîtes, cette tige fait mouvoir un cadre, guidé sur une table. C'est sur ce cadre qu'il nous faut maintenant concentrer spécialement notre attention : il porte à sa partie antérieure deux déclics, auxquels est dévolue l'importante fonction de la conduite des plaques de détente.

Chaque plaque est munie d'une tige, qui sort de sa boîte respective et vient présenter son extrémité en face du cadre mobile : le diamètre de ces tiges est tel que la pression de la vapeur suffise pour les pousser et les ramener constamment vers le centre du cylindre. Voilà donc que les deux extrémités des tiges, munies de têtes en acier, viennent se présenter de chaque côté du cadre, en face des déclics. Ces pièces, dont la forme rappelle celle d'une clef de sol, sont équilibrées de telle sorte par rapport à leur point d'oscillation que, livrées à elles-mêmes, elles appuient sur les têtes en acier des tiges et les poussent devant elles dans leur mouvement alternatif de gauche à droite et de droite à gauche. Les plaques de détente participent donc au mouvement du cadre, tant que les déclics ne sont pas entravés dans leur marche ; mais il suffit d'une pesée sur leur partie supérieure pour les faire déclencher et rendre leur indépendance aux plaques : pressées par la vapeur, celles-ci sont refoulées aussitôt vers le centre du cylindre et elles obturent instantanément les orifices des tiroirs. Le choc est atténué par un *dashpot*, c'est-à-dire par un piston à frottement doux dans lequel une couche d'air comprimé fait matelas et amortit la force vive des pièces en mouvement.

Il nous reste à dire comment se fera la pesée qui fait déclencher le déclic : elle résulte de la rencontre de la partie supérieure de ce déclic avec une touche, dont la position est déterminée par le régulateur ; l'arrêt fait basculer le déclic et dégage les touches des tiges.

Le dispositif que nous venons de décrire procède évidemment du déclic Corliss, que nous étudierons plus loin; mais MM. Baudet et Boire ont eu le mérite d'en faire une excellente adaptation aux tiroirs de détente du genre Farcot.

Il est vrai de dire qu'il existe un certain nombre de distributions à déclic analogues : nous nous contenterons de leur consacrer une indication sommaire.

M. Claudius Jouffray a perfectionné l'appareil de Baudet et Boire, qui présentait, comme toutes les distributions Farcot, l'inconvénient de ne point permettre de longues détentes ; en effet, pour que le déclanchement s'opère à temps, il faut nécessairement que les déclics marchent encore dans le sens de l'ouverture des lumières en refoulant les tiges contre la pression de la vapeur : cela n'a lieu que pendant la moitié de la course, tout au plus. Pour reculer les limites de l'introduction, il fallait conduire le cadre, portant les déclics, par un excentrique spécial. Nous allons donc retrouver dans la détente Jouffray tous les organes de la précédente, avec de légères modifications de forme, de dimension ou de position ; seule la commande du cadre porte-déclics changera. Elle est obtenue par un excentrique spécial, dont c'est l'unique fonction ; comme on veut que son action permette une détente aux 8 dixièmes, on est obligé de la caler en retard ; on recueille le second avantage d'obtenir au début un découvrement plus rapide des lumières.

M. Raymond, ayant eu à modifier une ancienne machine à tiroir unique, trouva un moyen aussi ingénieux que simple de faire varier l'admission au gré du régulateur : à cet effet, il plaça sur la boîte à vapeur une soupape, que la vapeur devait traverser nécessairement, et qu'il s'agissait de fermer pour commencer la détente à l'instant voulu ; un ressort pressait la soupape sur son siège, et sa fermeture était donc automatique. Pour l'ouvrir, cet ingénieur faisait agir sur elle une came, par l'intermédiaire d'un déclic semblable à ceux que nous avons décrits ci-dessus ; cette action s'exer-

çait dès le début de la course. Le décrochage du déclic rendait sa liberté à la soupape, qui retombait aussitôt, sous la poussée du ressort ; ce décrochage s'obtenait par un basculement du déclic, sous l'action du régulateur, comme dans les dispositifs précédents. Le plus grand défaut de cette détente est de ne pas couper l'admission de vapeur assez brusquement, attendu que la capacité de la boîte à vapeur donne une détente de vapeur.

Nous pourrions multiplier ces exemples, mais nous croyons en avoir asssez dit pour que le lecteur ait une idée suffisamment exacte de ce genre d'appareils ; après avoir été l'objet d'un engouement excessif, ils sont aujourd'hui beaucoup moins appréciés. De fait, le mécanisme de déclenchement est toujours délicat et coûteux ; l'usure des articulations et des touches d'acier provoque souvent des ratés, qui sont nuisibles à la régularité de la marche ; enfin, la vitesse d'une machine à déclic est limitée et ne peut guère dépasser 70 à 80 tours.

Si l'on veut bénéficier des avantages des déclics, il convient de les appliquer à des distributions à quatre tiroirs : c'est le type en vogue, auquel nous allons consacrer le paragraphe suivant.

II. **Distributions à quatre distributeurs.** — En 1841, un constructeur américain [1], nommé Sickels, fit breveter une distribution nouvelle à quatre tiroirs, placés aux extrémités du cylindre, et commandés séparément : deux d'entre eux servaient à l'admission, les deux autres à l'échappement. L'idée était en opposition directe avec les principes admis jusqu'alors sur les données de Watt ; autrefois, en effet, on cherchait la perfection en imposant une fonction multiple à un organe unique, maintenant on pensait faire mieux en multipliant les organes et en réduisant à une seule la fonction qui leur était dévolue.

[1] Voir Thurston, *Histoire de la machine à vapeur*, II, p. 94.

Il faut reconnaître que Sickels avait raison, car il disposait à son gré de toutes les phases de la distribution; la détente devenait indépendante de l'échappement et de la compression ; de plus, en disposant les quatre lumières aux extrémités du cylindre, l'on réduisait au minimum les espaces nuisibles; les orifices d'échappement étaient distincts des orifices d'admission, et il n'y avait plus de refroidissement du métal entraînant une condensation de vapeur à l'admission ; enfin, en plaçant au bas du cylindre les lumières d'échappement, on ouvrait une issue facile aux eaux entraînées ou condensées.

Sickels donna la préférence aux soupapes sur les tiroirs ; elles étaient soulevées par des cliquets qui pouvaient être déclenchés par un coin, contre lequel ils butaient en se levant avec la soupape; un régulateur réglait le degré de détente. Toutefois ce dernier détail paraît dû à Georges Corliss, et il constitue un des traits caractéristiques du distributeur qu'il fit breveter en 1849[1]. En 1855, Green fit connaître une machine du même genre. Sickels, Corliss et Green sont les créateurs des machines à quatre tiroirs, qui jouissent aujourd'hui de la plus grande vogue.

La machine Corliss ne fut connue en Europe qu'en 1867 et elle dut sa célébrité à l'Exposition de Paris; les Anglais et les Belges lui accordèrent une grande attention et on en construisit dès lors un grand nombre dans ces deux pays, alors qu'en France on ne suivit ce mouvement que de loin.

Mais dès 1873 (l'Exposition de Vienne en donna la preuve), la machine Corliss avait conquis sa place dans l'opinion des ingénieurs; elle fut imitée ou contrefaite, perfectionnée ou détériorée, par un grand nombre d'inventeurs, de valeur fort différente, sur lesquels nous nous abstiendrons de formuler louange ou blâme. Comme le jeu des pièces d'attaque

[1] La première machine Corliss brevetée était à balancier, avec tiroirs plans.

était seul resté brevetable, on se trouvait peu gêné ; il n'y avait qu'à combiner un jeu de bielle, de leviers et de cames ou d'excentriques pour obtenir un système nouveau, qu'on s'empressait de déclarer plus simple et plus économique que les autres. Le charlatanisme se donna libre carrière.

Nous ne parlerons que d'un petit nombre de distributeurs, en donnant à Corliss la place d'honneur qui lui revient.

La machine Corliss présente plusieurs dispositifs ; le premier, créé en 1867, est appelé à *lame de sabre ;* c'est le plus connu et il a été construit avec une grande perfection par M. van der Kerchove, de Gand, et M. Le Gavrian, de Lille. Un autre dispositif est dit à *bielles suspendues ;* il a été appliqué surtout en Allemagne. En 1879, parut le type désigné sous le nom de machine à *pattes d'araignée*, lequel a encore été perfectionné en 1884 et dans lequel l'action du régulateur est devenue d'une admirable précision.

Dans le premier dispositif[1], un excentrique, calé sur l'arbre moteur, transmet un mouvement de va et vient à un plateau-disque, mobile autour de son centre, et placé à l'extrémité du bâti, en avant du cylindre ; ce plateau commande les quatre tiroirs circulaires en attaquant leurs manivelles, par l'intermédiaire des bielles. Pour les tiroirs de décharge, la transmission est continue ; les bielles sont d'une pièce. Les tiroirs d'admission sont au contraire actionnés par des bielles à déclic, que nous regrettons de ne pouvoir décrire sur un dessin à grande échelle. Prenons en détail les pièces qui donnent le mouvement à un des tiroirs supérieurs d'admission : nous y voyons une lame de sabre, oscillant autour d'un axe placé sur le sol, une barre horizontale portant un déclic à deux branches, dont la branche in-

[1] Ces descriptions seront complétées dans le chapitre consacré à la monographie des principaux types de machines : mais il convenait de faire d'abord une étude générale des déclics américains.

férieure horizontale pousse la tige, laquelle est guidée dans un cylindre de *dashpot*, et reliée à la manivelle du tiroir; mais cette tige est attachée d'autre part à un grand ressort, plié sur la lame de sabre, qui la rappelle constamment en arrière. Le plateau-disque fait osciller la lame de sabre, la barre et son déclic, et le tiroir se trouve poussé en avant, c'est-à-dire ouvert, malgré la tension du ressort qui fléchit; supposons qu'une pesée effectuée sur la branche supérieure du déclic le fasse déclencher, voilà que le tiroir, rendu libre, obéit au ressort et il se ferme instantanément. Le *dashpot* amortit le choc de retour. L'admission sera limitée par le régulateur, parce que la pesée est effectuée sur le déclic par un talon, dont la position dépend de celle de la douille du régulateur.

Dans le second dispositif, le plateau-disque occupe le milieu de la longueur du cylindre, au centre des quatre tiroirs qu'il doit mouvoir ; on se rend facilement compte de la manière dont ceux-ci sont mis en mouvement. Bornons-nous à dire comment s'opère la commande d'un des tiroirs d'admission. Une bielle, articulée sur le plateau-disque, se trouve suspendue d'autre part au manneton de la petite manivelle du tiroir; elle la pousse en avant quand la bielle suspendue marche en avant. Mais en tournant, le manneton s'élève; or, un butoir arrête la bielle dans sa translation perpendiculaire à son axe et le dégage d'avec le manneton, qui obéit alors à l'action d'un ressort de rappel : la hauteur du butoir varie avec la position des boules du régulateur; la longueur de la course pendant laquelle se fait l'admission est donc limitée par le régulateur. Dans ces machines, on rappelle le tiroir soit par un ressort à boudin, soit par un poids, soit encore par un piston sur lequel presse continûment la vapeur de l'enveloppe; depuis quelque temps les constructeurs donnent la préférence aux pistons pneumatiques auxquels on adjoint toujours un *dashpot* d'amortissement.

Corliss n'a point cessé de perfectionner son œuvre jusqu'à

sa mort, survenue en 1889. En 1879, parut la machine à pattes d'araignée; ce grand distributeur, aux formes grêles et contournées, qui remplace le plateau-disque, est assurément peu satisfaisant à la vue et critiquable au point de vue de l'esthétique, mais les ingénieurs ont d'autres soucis, et ils ont réussi de la sorte à raccourcir les biellettes et à rendre plus sensible et plus précise l'action du régulateur. En 1884, ce type fut encore amélioré et le déclic ne comporta plus aucun plan incliné, ni aucune came, ce qui permet de le régler avec une précision mathématique et sans tâtonnement. Nous en donnerons la description en faisant la monographie des machines de la maison Crépelle et Garand, de Lille, et de celles du Creusot, qui se partagent, en France, le monopole de l'exploitation des brevets Corliss.

Corliss a eu beaucoup d'imitateurs; nous ne pourrons nous arrêter à faire connaître par le détail tous les dispositifs imaginés pour obtenir, comme lui, une ouverture rapide des tiroirs et une fermeture instantanée par le régulateur.

Green fut son premier concurrent.

La machine de Green est peu connue en Europe; l'appareil de détente consiste en une barre, qui reçoit de l'excentrique un mouvement parallèle à l'axe du cylindre et dont la marche coïncide presque avec celle du piston. Cette barre porte des cames, dont la hauteur est variable et change avec la position du régulateur. Ces cames agissent sur les mannettes des tiroirs d'admission; elles restent en prise avec elles un temps plus ou moins long et maintiennent ainsi l'ouverture des tiroirs pendant une portion plus ou moins longue de la course. Les tiroirs d'échappement sont manœuvrés par une tringle spéciale, mûe elle-même par un excentrique calé à angle droit sur la manivelle.

En Angleterre et en Belgique, il s'est construit beaucoup de détentes Ingliss et Spencer : nous y retrouvons encore un plateau disque au milieu du cylindre, mais le mode de commande des tiroirs d'admissions mérite seul d'arrêter

notre attention. La bielle d'attaque a la forme d'une fourche, composée de deux branches flexibles, dont l'écartement variable est déterminé par un coin, déplacé par le régulateur : quand les branches sont dans leur position normale, elles appuient sur un butoir relié au tiroir et elles le poussent en avant. Mais, en avançant, les branches s'engagent sur le coin et elles s'ouvrent à un moment donné : le butoir leur échappe bientôt, et le tiroir se referme sous l'action d'un ressort.

La maison Bède et Cie, de Verviers, dont l'auteur de cet ouvrage a été ingénieur pendant plusieurs années, avait créé un type spécial de détente à déclic, qui fut perfectionné avec la participation de M. Farcot ; elle est connue pour ce motif, sous le nom de détente Bède et Farcot. Le régulateur est monté sur un arbre vertical placé au milieu du cylindre : cet arbre porte deux cames, dont l'une commande les deux tiroirs d'admission et l'autre les deux tiroirs de décharge. Nous ne décrirons que l'appareil spécialement chargé de la manœuvre des tiroirs d'admission. La came supérieure se meut dans un cadre, glissant sur une glace ; sur ses côtés sont articulés deux déclics analogues aux déclics Corliss précédemment étudiés, dont la branche inférieure horizontale est à butoir, tandis que la branche supérieure est entourée par un manchon, suspendu au régulateur ; cette branche a d'ailleurs une direction oblique. Le va-et-vient du cadre est utilisé pour pousser tour à tour les deux bielles horizontales des tiroirs ; mais cette poussée est limitée par le manchon, car le déclic bascule dès que sa branche oblique heurte l'intérieur du manchon ; le tiroir retombe dès que le déclenchement est produit. Comme dans les dispositifs analogues, le rappel du tiroir est produit par un ressort, un poids ou bien un ressort-vapeur.

Aujourd'hui la tendance des ingénieurs est à la simplification, et la détente Frikart mérite d'être signalée à ce point de vue : elle appartient au genre de distribution par *arai-*

gnée, qui s'est assez répandu depuis quelques années. L'excentrique attaque, par renvoi de mouvement, un plateau-disque dans lequel on a découpé quatre pattes, dont chacune d'elles actionne un tiroir : la forme bizarre de cette pièce explique la désignation que l'on fait de ces machines. Le déclic est assez simple : les manivelles des tiroirs sont folles sur leurs axes, et elles ne les entraînent qu'après l'enclenchement d'un cliquet sur une came, calée sur ces axes. Ce cliquet ne fait prise que sous l'action du régulateur, par l'intermédiaire d'une série de leviers, dont les fonctions ne peuvent être expliquées sans dessin.

Il est à remarquer que l'arête du cliquet décrit une courbe non concentrique à l'axe de la tige du tiroir, de telle sorte que le déclenchement devient possible pour toute position de la manivelle : la détente peut donc varier entre des limites fort larges.

C'est là du reste le grand progrès réalisé par les ingénieurs à la suite de Corliss qui est toujours resté leur initiateur et leur maître : sa première machine ne permettait pas de prolonger l'admission au delà de 4 dixièmes, tandis qu'aujourd'hui les admissions varient de 0 à 75 pour 100.

Au lieu d'employer des tiroirs circulaires ou plans, disposés aux extrémités du cylindre, l'on peut se servir de soupapes équilibrées : ce genre de machines a été construit avec un grand succès par MM. Sulzer frères, de Winterthur (Suisse), et il a acquis une grande vogue. L'espace nuisible est un peu plus considérable que dans les types précédents, mais on arrive à en réduire le volume en disposant les soupapes dans les couvercles.

Il existe deux modèles de distributions Sulzer ; nous allons les étudier tour à tour.

Dans la première disposition, les deux soupapes d'évacuation, placées sous le cylindre, sont mûes par l'intermédiaire de cames ; les soupapes d'admission, disposées sur le cylindre, sont actionnées par un appareil à taquet. Ce mou-

vement a seul de l'intérêt pour nous. Sur un arbre parallèle au grand axe de la machine est calée une poulie d'excentrique qui fait mouvoir un levier à fourche, dirigé obliquement de l'arbre à came vers la soupape : ce levier à fourche porte, entre ces deux branches, un taquet, qui décrit une courbe elliptique. En face de ce taquet, se trouve un butoir, relié à la tige de soulèvement de la soupape : quand le taquet trouve le butoir sur sa trajectoire, il l'entraîne avec lui et il ouvre la soupape. Mais la position de ce butoir change avec celle des boules du régulateur ; la durée de l'ouverture de la soupape change par cela même, et c'est ainsi que la détente est variable par le régulateur. Ce dispositif remonte à 1867 et il a été fréquemment appliqué jusqu'en 1878.

A cette époque, MM. Sulzer adoptèrent leur second dispositif, qui ne diffère pas essentiellement du premier : nous y retrouvons l'arbre horizontal et ses excentriques, tournant avec la même vitesse que l'arbre du volant. La barre d'excentrique est très courte et sa direction est horizontale : elle est guidée par une biellette articulée sur un point fixe, qui impose à son extrémité une trajectoire ovale. Une tringle oblique, occupant la position du levier à fourche du précédent appareil, donne un mouvement alternatif de va-et-vient à un sabot placé sur le cylindre, en face du levier de la soupape d'admission. Ce sabot est monté lui-même sur un levier coudé, déplacé par le régulateur, de manière à ce que l'action du sabot se prolonge plus ou moins longtemps sur la soupape.

La distribution Collmann n'est pas sans analogie avec le dispositif Sulzer : toutefois les soupapes d'admission et d'échappement sont placées l'une à côté de l'autre à chacune des extrémités du cylindre ; l'arbre de commande est encore parallèle à l'axe du cylindre, mais il porte des manivelles an lieu d'excentriques. Ces manivelles actionnent un levier coudé, disposé au-dessus des soupapes, lequel décrit une oscillation dont l'amplitude correspond à la pleine admission.

Pour réduire l'admission par le régulateur, il y a un système de bielles à genou faisant un angle variable et donnant par suite à la commande une longueur variable, d'où une admission partielle.

Il nous reste enfin à signaler la détente Nollet, opérant l'admission par deux soupapes placées sur les côtés du cylindre et l'échappement par des tiroirs plans à grilles, qui glissent sous le cylindre par l'effet d'une came. La manœuvre de la soupape d'admission s'effectue de la manière suivante : sa tige est composée d'un cylindre massif et d'un manchon creux concentriques, engagés l'un dans l'autre. Le cylindre est rappelé de haut en bas par un lourd contrepoids ; le manchon porte la soupape. Or, le cylindre central est appuyé sur une came, qui tend à lui donner un mouvement alternatif d'élévation et d'abaissement, lequel est partagé par le manchon, lorsqu'un verrou pénètre dans une encoche et rend les deux pièces solidaires ; mais si l'on retire ce verrou et qu'on le dégage de cette encoche, le manchon retombe avec la soupape, laquelle se trouve alors fermée. Il suffit donc, pour fermer la soupape, de pousser ce verrou : c'est le régulateur qui remplit cette fonction par l'intermédiaire d'une virgule, qu'il incline plus ou moins et dont par conséquent il hâte plus ou moins l'intervention. Ajoutons qu'une cataracte diminue le choc de la soupape dans sa retombée et nous aurons décrit les éléments principaux de la détente Nollet.

Nous aurions bien d'autres appareils à déclic à décrire pour être complets, mais nous sommes limités par notre format ; d'ailleurs, il suffit de connaître un certain nombre de types pour être à même de se rendre compte de l'agencement de tous les systèmes en usage, car ils ne diffèrent entre eux que par quelques détails, plus ou moins ingénieux. Nous reviendrons du reste sur ce sujet en abordant par le détail l'étude des machines les plus connues.

CHAPITRE VII

LES ORGANES DE LA MACHINE A VAPEUR

Après avoir décrit les divers types de machines à vapeur et les dispositions générales des organes qui les composent, il nous reste à étudier séparément ces organes, en faisant ressortir les qualités nécessitées par leur fonction. Nous commencerons par le cylindre, qui est l'âme du moteur, puis nous passerons tour à tour en revue le piston, la bielle, les glissières, la manivelle et le volant ; nous aborderons ensuite l'examen du tiroir, de l'excentrique et de son collier, des coulisses de Stephenson et de Gooch, du régulateur, du condenseur et de ses accessoires.

I. **Cylindre.** — C'est un tube cylindrique, son nom l'indique, coulé en fonte et portant les colliers d'attache des fonds, ainsi que les lumières d'admission et d'échappement. Les fonds sont boulonnés sur les colliers et l'étanchéité est obtenue par un joint de minium ou de mastic, quelquefois par l'interposition d'une feuille de caoutchouc dur.

Le cylindre des machines primitives avait une forme compliquée, parce que les canaux de distribution étaient obligés de s'étendre depuis les extrémités jusqu'au centre, où était établie la table du tiroir (fig. 19). Dans les cylindres des machines nouvelles du genre Corliss, la disposition est toute différente : car les quatre cylindres qui renferment les distributeurs sont logés deux par deux aux extrémités du cylindre, leurs axes étant dirigés à angle droit sur l'axe principal ; le travail du fondeur a évidemment été simplifié par la suppression des longues conduites.

Mais les difficultés que présentent les cylindres à tiroirs plans ne sont pas insurmontables et, malgré la complication des enveloppes de la vapeur, on réussit fort bien aujourd'hui

la coulée de ces pièces. Nous citerons comme exemple le double cylindre de la machine verticale Compound de MM. Buffaud et Robatel, constructeurs à Lyon, dont on peut voir les coupes diverses sur le dessin de la figure 20. Le grand cylindre, le petit cylindre, les enveloppes et le *receiver* [1] sont fondus d'une pièce ; un courant de vapeur vierge circule autour des cylindres et réchauffe le *receiver* par sa paroi

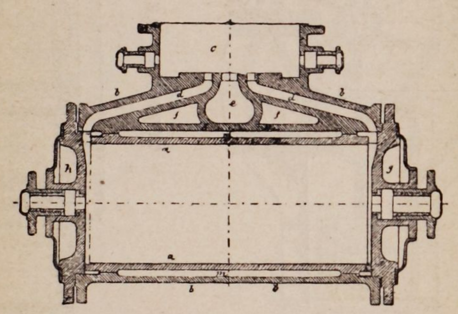
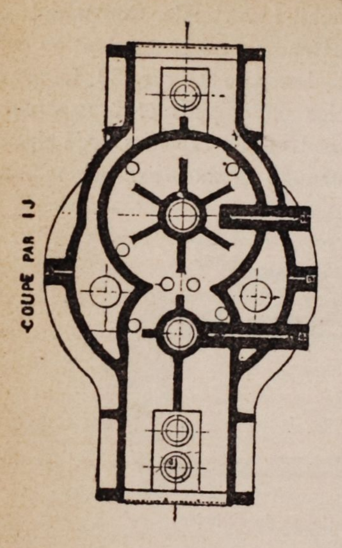


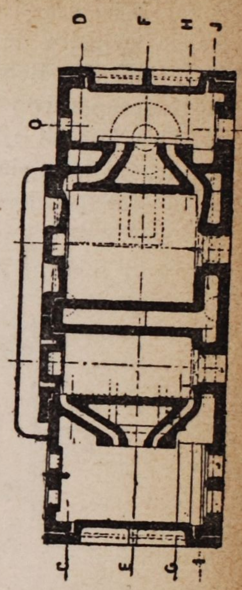
Fig. 19. — Coupe du cylindre.

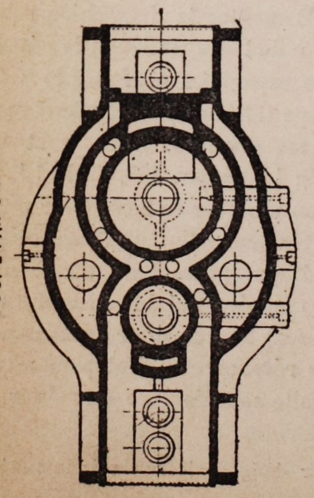
intérieure. La coupe par AB montre la disposition relative des deux cylindres, les glaces de leurs tiroirs et le réservoir intermédiaire, dont la vaste capacité a neuf fois le volume du petit cylindre ; sur la coupe C D, on se rend mieux compte encore de la manière dont ces divers éléments sont combinés l'un avec l'autre ; enfin les coupes EF, GH, IJ, KL, MN, OP, sont nécessaires au mouleur en terre pour réaliser complètement et exactement la conception de l'ingénieur.

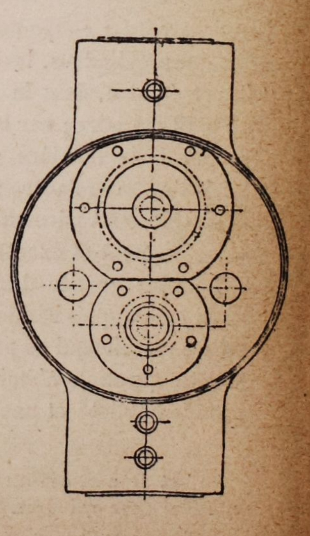
La plus grande difficulté que présentent des moulages aussi compliqués réside dans la nécessité de ménager au métal les retraits qui se produisent lors de son refroidissement : si cette question n'était pas résolue, et il faut pour cela une grande habileté et une parfaite connaissance du métier, il se

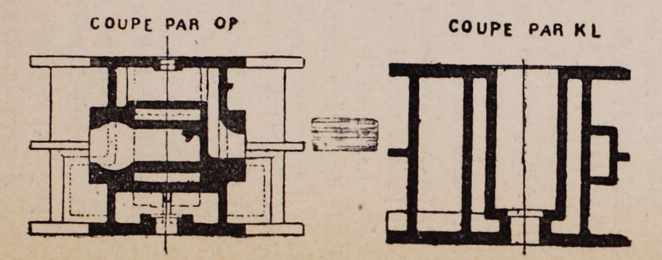
[1] C'est le nom consacré pour désigner le réservoir intermédiaire entre les deux cylindres.

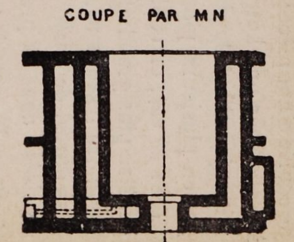

COUPE PAR IJ


COUPE PAR AB
C
D
E
F
G
H
I
J
O
P


COUPE PAR GH







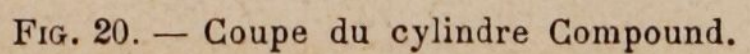


Fig. 20. — Coupe du cylindre Compound.

produirait inévitablement des fentes et des retraits. De nombreux accidents de ce genre sont survenus dans les cylindres venus de coulée d'une pièce ; c'est ce qui a amené les constructeurs à rechercher une autre manière de faire.

On fait aujourd'hui le plus généralement les cylindres à enveloppe en plusieurs pièces. On peut les former de deux pièces : dans ce cas, on coule d'abord l'enveloppe extérieure d'un diamètre plus grand que celui du piston, et on y introduit le cylindre travailleur, qui a été fondu à part, avec des fontes plus dures, de qualité spéciale ; le joint se fait sur des portées alésées dans la première pièce, tournées au même diamètre dans la seconde ; cet ajustage complique un peu le travail, mais il donne de meilleurs cylindres. Les fonds s'appuient alors par un double joint sur le cylindre intérieur et sur son enveloppe. Mais on fait aussi des cylindres en quatre pièces, quand on veut placer les distributeurs Corliss contre les fonds, comme l'ont fait d'abord MM. Bède et Farcot ; cet exemple à été suivi par les meilleurs constructeurs.

Mais revenons au cylindre du type le plus courant.

Le couvercle d'avant doit nécessairement livrer passage à la tige du piston, mais il faut qu'elle soit entourée d'une garniture étanche, sinon il se produirait une fuite de vapeur le long de la tige. Pour assurer cette étanchéité, on munit le couvercle d'une amorce cylindrique, d'un diamètre plus considérable que celui de la tige ; dans cette boîte, dite *boîte à étoupes* ou *stuffing-box*, on serre de l'étoupe, de la filasse, de la corde grasse ou tout autre bourrage et on boulonne par dessus un couvercle, dit *presse-étoupes*, de manière à comprimer graduellement et fortement le corps mou. On remplace quelquefois l'étoupe par des colliers métalliques en alliage doux, formés d'étain, d'antimoine et de plomb. On a aussi employé avec succès des bagues de bronze derrière lesquelles on serre du chanvre dans la boîte à étoupes : on retrouve ainsi les facilités de serrage des anciens *stuffing-box* et les garnitures sont plus durables. En Angteterre, on

emploie fréquemment le *métallic packing* de M. Gabriel, dans lequel des demi-bagues, tournées en cône à l'extérieur, sont pressées sur la tige par deux cônes inverses dans lesquels ils sont emboîtés : dans ce cas, les cônes opèrent le serrage en se rapprochant l'un de l'autre ; c'est un dispositif recommandable.

Généralement le fond d'arrière est entièrement fermé ; mais dans les grandes machines horizontales, il est préférable de prolonger la tige du piston et de lui faire traverser un second presse-étoupes qui la guide, la soutient et retarde l'ovalisation du cylindre.

Le cylindre et l'enveloppe doivent être munis de purgeurs, pour l'élimination des eaux de condensation.

Piston. — Le piston est l'organe actif de la machine : c'est une masse de fonte tournée au diamètre du cylindre et munie d'un bourrage pour faire joint.

Au début, on employait des garnitures de chanvre comprimées par des couronnes mobiles ; ce moyen, qui est tout au plus admissible pour les pistons de condenseur, a été rejeté pour les pistons à vapeur, parce que le chanvre se brûlait et s'usait rapidement ; de plus, le ligneux de la fibre rayait la surface intérieure du cylindre.

On remplaça donc le chanvre par des garnitures de métal dont le frottement est plus doux et la durée plus grande : on employa d'abord des segments de cercle, qui étaient appliqués contre la paroi, soit par les coins, soit par des ressorts. La masse du piston était constituée par deux épais disques de fonte, rattachés par des boulons et laissant entre eux un intervalle rempli par les segments superposés sur deux ou trois rangs : les ressorts s'appuyaient d'une part sur le moyeu et agissaient d'autre part sur l'intérieur des segments. Ce dispositif était bon, mais compliqué et coûteux : toutefois pendant longtemps, on ne sut faire mienx.

On imagina un jour de demander aux segments eux-mêmes la réaction fournie par les ressorts : à cet effet, on eut l'idée

de faire le segment d'une pièce, et de le découper dans un cercle de fonte d'un diamètre légèrement supérieur à celui du cylindre. On comprima ce cercle sur lui-même de manière à le faire entrer de force dans le cylindre : en vertu de son élasticité, il faisait toujours joint. Il est vrai qu'une fuite pouvait se produire à la section du cercle, par la génératrice de contact de ses extrémités : on y obvia en se servant de *cache-joints*, et mieux encore en multipliant les cercles, et en croisant leurs joints. Nous venons de décrire le piston *suédois*, universellement adopté aujourd'hui et représenté par la figure 21.

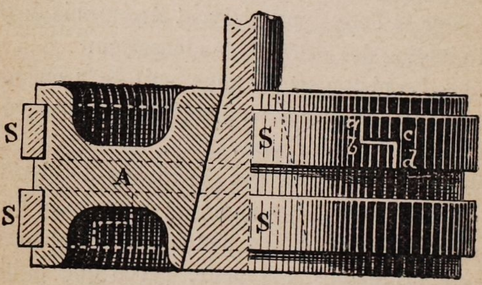


Fig. 21. — Piston suédois.

Ramsbottom a fait des pistons d'une seule pièce, sur la surface latérale desquels il creusait des rainures : il y logeait des cercles suédois S, fendus obliquement pour mieux s'opposer aux fuites, faisant une légère saillie sur le corps du piston de sorte que le piston posait sur les cercles et non pas sur son bloc. Ce système est fort répandu, et il convient parfaitement aux cylindres de fort diamètre ; mais, pour les petits cylindres, on éprouve trop de difficultés à introduire le cercle dans la rainure et il vaut mieux alors construire le piston suédois de deux pièces.

Il y a quelques modifications à signaler dans l'application du piston suédois ; ainsi A. Prior fait des cercles creux, dont il augmente et uniformise l'élasticité par un ressort en fil

d'acier replié un grand nombre de fois sur lui-même; M. Alexandre Oldham creuse la rainure en spirale autour du piston, qu'il allonge considérablement et il y glisse une lame d'acier mince très élastiqne: ce dernier piston convient aux machines à grande vitesse.

Les pistons de condenseur se font plus simplement; on s'est bien trouvé de l'emploi de bagues de caoutchouc engagées dans des rainures tracées dans le bloc de fonte.

Les types de piston sont emmanchés dans le bloc à la presse hydraulique; quelquefois on les munit d'un renflement conique, sur lequel la masse de fonte est maintenue par un écrou de serrage. Cet écrou est saillant ou noyé: dans le premier cas, on ménage une cavité dans le couvercle et l'écrou vient s'y engager à fond de course. Il importe que le piston soit parfaitement fixé sur sa tige, car un desserrage aurait de terribles conséquences dans une machine dont on a intérêt à réduire au minimum les espaces nuisibles.

Les tiges se font en acier Bessemer ou en fer corroyé, à grains serré, quelquefois même en acier fondu; le métal prend alors un beau poli, il ne se raie pas et l'on peut réduire considérablement le diamètre de la tige et des *stuffing-box*.

Nous compléterons ces indications techniques en donnant les proportions usuelles des divers organes que nous venons d'étudier.

La longueur de la course est généralement comprise entre un ou deux diamètres du cylindre; on sait que la surface minimum par unité de volume correspond à une longueur égale au diamètre. Dans la marine, on voit des cylindres plus courts que leur diamètre; au contraire, dans les machines d'extraction, on rencontre souvent des longueurs supérieures à deux diamètres.

La vitesse moyenne du piston varie beaucoup avec la destination des machines: elle est de $0^m,50$ pour les machines menant directement des pompes; elle est comprise entre

$0^m,80$ et 2 mètres pour les machines d'usine, mais il y a une tendance à exagérer les vitesses, et l'on a été jusqu'à 3 mètres quelquefois ; dans les locomotives, on rencontre des vitesses de $3^m,50$ à 4 mètres ; on a dépassé même 4 mètres dans certaines machines de torpilleurs, mais il semble que ce soit une limite supérieure.

La longueur de la bielle se règle d'après la course: on la prend d'habitude égale à 5 fois le rayon de la manivelle, mais on diminue nécessairement cette longueur dans les machines de navigation, au détriment de ces machines. Les machines de mines, qui ne manquent jamais d'espace, ont le plus souvent des bielles six et même sept fois plus longues que la manivelle.

III. **Bielle et glissières.** — La bielle est la pièce qui relie le piston à la manivelle, par une double articulation, de manière à pouvoir transformer le mouvement de va-et-vient en un mouvement continu de rotation.

L'articulation sur la tige se fait par l'intermédiaire d'un bloc de fer, dans lequel est enfoncée et calée l'extrémité de la tige, tandis que la bielle s'y rattache par un pivot ; ce bloc s'appelle la *crosse* du piston : il est muni de larges patins, qui reposent sur les glissières.

Ces glissières remplissent un double rôle, car elles guident la tige, en même temps qu'elles supportent le composante transversale de la force agissant le long de la bielle : si nous appelons P la force transmise par la tige du piston, la composante transversale f sera égale à $P \operatorname{tg} \alpha$, α étant l'angle formé par la bielle avec l'axe du cylindre ; il est à remarquer que, pour une rotation de même sens, la force f s'exerce toujours dans la même direction : dans le cas de la figure 22, la force f tend à soulever la crosse et elle diminue d'autant son poids et par suite sa poussée sur la glissière. Une seule guide suffirait en réalité dans les machines dont le sens de rotation ne change pas, mais on en fait presque toujours deux.

Pour adoucir les frottements, quelques constructeurs ont adopté des guides à galets, qui substituaient un roulement à un glissement ; néanmoins on n'a pas persévéré dans cette voie, car il fallait laisser du jeu aux galets pour qu'ils puissent rouler, et ce jeu donnait lieu à des chocs ; sans jeu, les galets ne tournaient plus et il s'y formait des plats par usure.

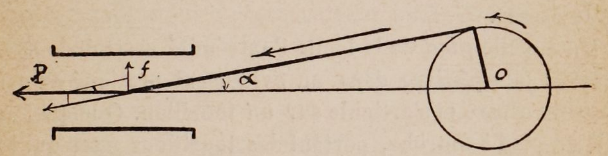


Fig. 22. — Glissières.

Les glissières planes sont les plus usitées : il importe de donner aux patins une large surface, de manière à ce que la pression P tg α se répartisse sur une grande base : on ne doit pas dépasser 10 à 20 kilogrammes par centimètre carré. Dans ces conditions, les huiles ne sont pas expulsées et elles lubréfient convenablement les surfaces en contact ; leur température tend à s'élever, car le travail de frottement se transforme en calorique, mais on arrive facilement à limiter cet échauffement, à 30 ou 40 degrés.

Il est à remarquer que la pression P tg α est variable ; nulle aux points morts, elle passe par un maximum correspondant à la plus grande déviation de la bielle, c'est-à-dire au milieu de la course environ : l'usure est donc maximum à ce point, et la guide tend à se creuser vers son milieu. Il en résulte une déformation fâcheuse des lignes, et l'on se voit obligé de rectifier les guides de temps en temps.

Dans les machines du genre Corliss, le bâti lui-même sert du guide ; la crosse porte alors de larges et longs patins, embrassant un tiers environ de la circonférence, et formant un cylindre façonné au tour ; les coulisseaux sont alésés et ils ont la forme d'un manchon, ouvert des deux côtés par

de larges fenêtres. Le bâti constitue en même temps le couvercle du cylindre, dont le joint est tourné d'après l'alésage, sur l'alésoir même, ce qui assure un centrage parfait. Ce dispositif à grandement facilité et amélioré le montage des machines à vapeur : on rattrape l'usure des glissières en faisant varier l'écartement des deux patins par un système d'écrou et de contre-écrou, appliqués sur les moignons filetés de la crosse.

On appelle *pied* de la bielle l'extrémité assemblée avec la crosse : elle pénètre dans un évidement pratiqué au centre de cette crosse et s'articule sur un tourillon. Quelquefois on fait un pied à fourche, portant des tourillons fixes qui tournent dans les coussinets de la crosse.

La *tête* de bielle est l'extrémité qui embrasse le bouton de manivelle : elle doit permettre un serrage facile. La tête est ou *fermée* ou bien à *chape*; dans le premier cas, le coussinet est placé dans une loge pratiquée dans le métal, dans le second il est appliqué contre le bout de la bielle par une bride, dont on peut faire varier la position par le mouvement d'une clavette.

Dans les machines à balancier, on faisait de lourdes bielles en fonte; leur masse était une qualité : les machines à connexions directes doivent au contraire être pourvues de bielles légères, pour que les forces d'inertie soient atténuées le plus possible, et on les fait toujours en fer forgé.

Watt avait trouvé moyen de supprimer les glissières dans sa grande et belle machine à balancier, par l'emploi d'un ingénieux mécanisme, le *parallélogramme* de Watt, que nous mentionnerons pour mémoire, car il n'est plus employé aujourd'hui, même dans les machines à balancier.

Le parallélogramme établissait entre l'extrémité oscillante du balancier et la tête du piston, astreinte à suivre une trajectoire rectiligne, une liaison telle que l'une pût osciller sans que l'autre cessât de marcher en ligne droite. Ce résultat était atteint approximativement à l'aide du dispositif sui-

vant : la tige du piston, au lieu d'être attachée directement au balancier, était reliée au sommet d'un parallélogramme articulé ABCD (fig. 23), pouvant changer de forme dans le mouvement d'oscillation du balancier. Le point B décrit alors un cercle dont O est le centre, et il en est de même de A ; le point D, rattaché en E par la tringle ED, parcourt d'autre part un arc de cercle dont E est le centre ; or, on démontre en cinématique que le mouvement du point C est dès lors

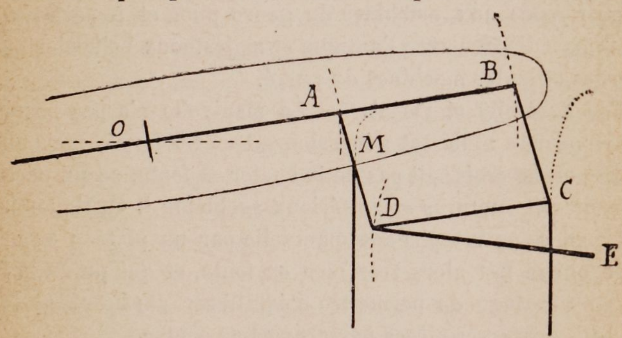


Fig. 23. — Parallélogramme de Watt.

rectiligne. Ainsi donc, le parallélogramme ABCD se déforme progressivement pendant le mouvement du balancier et tandis que B, A et D décrivent des arcs de cercle, C trace dans l'espace une ligne droite ; on peut donc fixer en C l'extrémité de la tige du piston.

Il est vrai que nous avons un peu exagéré les conclusions de la théorie ; en réalité C décrit une sorte de 8, qui se confond presque avec une ligne droite, mais qui en diffère néanmoins quelque peu ; notre figure montre la vraie trajectoire de C : elle est généralement compatible avec le jeu que peut tolérer une longue tige.

Habituellement on relie au point M, milieu de AD, des tiges de pompe ou bien la deuxième tige de piston d'une machine Woolf ; c'est que, en effet, ce point jouit de la propriété de se

mouvoir, comme le point C, à très peu près suivant une verticale. Ce point est au milieu de AD quand A est au milieu de OB ; d'une manière générale, M est situé à l'intersection du côté AD avec la ligne OC qui joint le point C au centre du balancier.

Le dispositif du parallélogramme devait être légèrement modifié dans les machines à balancier en dessous, qui étaient en usage pour les bateaux à roues. Mais aujourd'hui on donne la préférence aux machines du genre pilon et le parallélogramme a disparu avec l'antique et majestueux balancier des lourdes et lentes machines du passé.

IV. **Manivelle et volant.** — La manivelle n'a pas besoin d'être décrite : elle est généralement en fer forgé, mais autrefois on ne craignait pas de la couler en fonte, ce qui occasionnait des ruptures et de sérieux accidents [1]. Quelquefois, néanmoins, on remplace la manivelle par un plateau circulaire qui se fait alors très bien en fonte, et qui présente le grand avantage de permettre d'équilibrer parfaitement les poids des diverses pièces par rapport au centre.

La tête de bielle s'articule sur un pivot implanté normalement à la face de la manivelle : on l'appelle le *bouton* de manivelle ; c'est une pièce d'acier ou de fer de première qualité, qu'il faut pouvoir lubréfier parfaitement, sinon l'on s'exposerait à des chauffages et à des grippements dangereux.

La manivelle est calée sur l'arbre de couche ; cet arbre est formé d'une forte pièce cylindrique, qui repose par deux tourillons dans deux paliers et sur laquelle est fixée, à un bout, la manivelle, et généralement, au milieu, le volant. Les tourillons doivent avoir une grande longueur pour ne point porter une charge trop considérable : quoique cette charge se répartisse

[1] On proscrit de plus en plus la fonte dans les organes mobiles des machines ; la fonte a le défaut de casser brusquement, sans prévenir, disent les gens du métier ; le fer, au contraire, fléchit ou se tord quand sa résistance est dépassée et l'on est avisé du danger.

sur la moitié de la surface cylindrique, il n'y a aucun avantage à augmenter le diamètre, car le travail reste le même par unité de surface. Les bons constructeurs adoptent des longueurs de tourillons suffisantes pour que le travail par centimètre carré et par seconde n'atteigne jamais un kilogrammètre.

Les paliers des machines à vapeur sont disposés de manière à ce que les tourillons ne puissent jamais prendre de jeu : pour cela, les coussinets de bronze dans lesquels tourne l'arbre sont coupés en quatre pièces, dont l'une repose à demeure sur le corps du palier ; le chapeau porte une deuxième pièce et les deux autres sont disposées latéralement. Le serrage même du chapeau et la manœuvre de deux coins, par des vis, compensera exactement toute usure qui tendrait à se produire.

Par ce qui précède, on voit que généralement la manivelle est placée en porte-à-faux : cette disposition est fâcheuse, mais il est difficile d'éviter cet inconvénient ; il faudrait pour cela placer la manivelle au milieu, entre les deux paliers, ce qui obligerait de couder l'arbre. Les arbres en forme de vilebrequin sont très usités dans les petites machines ; mais pour les grosses machines, ils deviennent fort coûteux. Cependant on ne se laisse pas arrêter par cette question d'argent dans les cas où il est indispensable de condenser les machines le plus possible ; aussi trouve-t-on, dans les machines marines polycylindriques, des arbres à deux et même à trois coudes.

La nécessité du volant ressort de ce que la machine à vapeur passe par un point mort à chaque fin de course du piston ; au moment où le piston s'arrête pour revenir sur ses pas, le mouvement de la manivelle tend à s'arrêter aussi et sa vitesse angulaire diminue ; cette vitesse diminue encore quand la vapeur se détend derrière le piston et que sa pression effective baisse. Pour atténuer autant que possible ces changements d'allure, on installe sur l'arbre de couche une

roue présentant une masse considérable, dont l'inertie soit grande par rapport à celles des pièces mobiles du moteur : il faut dépenser du travail pour mettre cette masse en mouvement, mais aussi pourrait-on recueillir du travail si l'on se proposait de l'arrêter en pleine marche. Cette roue joue donc le rôle d'un véritable accumulateur : elle emmagasine de l'énergie quand on la met en marche, et elle restitue l'énergie quand la vitesse diminue ; elle empêche la machine de s'emporter et de s'emballer, mais elle vient à son secours quand elle faiblit ; en somme, elle entretient une vitesse de régime et donne au moteur la régularité d'allure qui est absolument nécessaire dans l'industrie.

Coriolis a inventé une méthode générale de détermination des dimensions des volants ; il détermine par une épure la valeur moyenne de l'effort tangentiel exercé sur le manneton de la manivelle pour une révolution ; cette valeur moyenne, qui est évidemment toujours positive, donne la valeur de la résistance en travail courant. Les efforts sont supérieurs à la moyenne au moment de l'admission de vapeur ; on mesure par une quadrature l'aire comprise entre la courbe des efforts et la courbe moyenne et l'on trouve ainsi une quantité de travail tendant à accélérer le mouvement de la machine ; à d'autres moments, l'effort peut être inférieur à la moyenne et alors la marche de la machine tend à ralentir. Soit $\mathcal{T}$ la valeur maximum ou minimum ainsi trouvée : le poids de la fonte du volant sera proportionnel à $\mathcal{T}$, et en raison inverse de son rayon R et de la vitesse de rotation de n tours par minute.

Le maximum de variation de vitesse pouvant être toléré dépend du service auquel on affecte la machine : c'est 1/15 pour une scierie, 1/40 pour un tissage, 1/50 pour un moulin à farine, 1/100 pour une filature à fils fins : on introduit en conséquence un coefficient variable dans la formule donnant le poids de la jante. Le volant sera donc plus lourd pour une machine de filature ; il le sera moins, quand on

emploiera des machines jumelées. La vitesse à la jante ne peut guère dépasser 15 à 18 mètres à la seconde.

Les petits volants se coulent d'une pièce.

Les très grands volants se font le plus souvent en pièces rapportées et ajustées : la jante est alors segmentée en autant de parties qu'il y a de bras, chaque morceau étant fixé par clavetage à son bras respectif et relié aux autres morceaux. Les bras eux-mêmes sont ajustés sur le moyeu. On a construit ainsi de beaux volants de 5 à 6 mètres de diamètre qui n'ont donné lieu à aucun accident. Mais les progrès réalisés par l'art du fondeur permettent aujourd'hui de faire d'une coulée des volants qu'on segmentait autrefois, et qu'on sépare en deux morceaux par une section diamètrale ; de forts boutons relient les deux parties du moyeu et les deux parties de la jante.

C'est par le volant que se transmet l'énergie du moteur aux outils qu'il commande : la jante est alors dentée, avec denture en bois, ou bien elle est élargie pour donner une grande surface de prise à la courroie, ou enfin elle est creusée en gorge pour recevoir des cables de chanvre, genre de transmission fort employé depuis une dizaine d'années.

Le volant de la machine exposée en 1889 par la maison Farcot était remarquable par sa construction, et il mérite d'être signalé : il mesurait 10 mètres de diamètre. Cette magnifique pièce se composait d'une jante en fonte nervée de $1^{m},50$ de largeur, pesant 21.000 kilogrammes, et fondue d'un seul jet, puis séparée en quatre segments ; chaque segment était porté par quatre bras. Ces bras étaient faits par l'assemblage d'une tôle d'acier rivée ; leur section était elliptique et décroissante du moyeu à la jante ; les plaques de tôles employées à cette construction avaient été pliées à la presse hydraulique. On avait rangé ces bras dans deux plans parallèles et on les avait reliés deux par deux par un léger treillis pour empêcher toute flexion transversale.

V. **Tiroirs.** — Pour obtenir un mouvement alternatif du

piston, il faut envoyer alternativement la vapeur sur chacune de ses faces et ouvrir en même temps une issue à la vapeur qui a épuisé son énergie sur le piston : cette fonction est remplie par le tiroir.

Le tiroir le plus simple est le tiroir dit *à coquille :* c'est une sorte de boîte en fonte T, sans fond, dont la base est

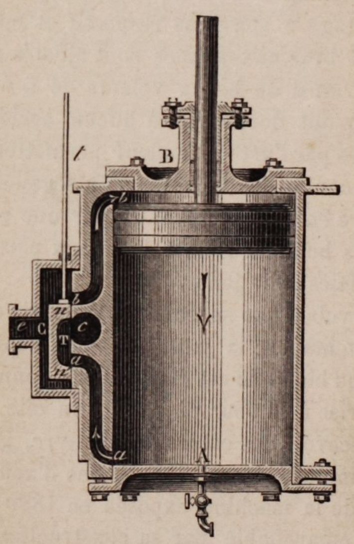


FIG. 24. — Distribution par tiroir.

soigneusement dressée, et qui s'appuie sur la *glace*, dans laquelle sont pratiquées les deux lumières d'admission et l'orifice d'échappement ; les lumières *a* et *b* communiquent avec les deux extrémités du cylindre, l'orifice *c* d'échappement conduit la vapeur à l'air libre ou bien au condenseur. La glace est venue de fonte avec le cylindre ; elle est logée au fond d'un cadre rectangulaire, fermé par un couvercle, et constituant une chambre C appelée la *chambre de vapeur*. La vapeur de la chaudière arrive dans cette chambre par un trou *e* percé dans le couvercle. Cet ensemble est

clairement représenté par la figure 24 : il est facile de voir comment le tiroir fait la distribution. Dans la position des pièces indiquée sur notre dessin, la vapeur entre par *b* et pousse le piston de haut en bas, tandis que la vapeur remplissant le cylindre est refoulée par le piston et s'échappe en suivant le chemin *a a* T C. Pour obtenir le mouvement rétrograde du piston, il suffira de déplacer légèrement le tiroir de façon à démasquer *a* et à mettre *b* en communication avec *c* par l'intérieur de la coquille.

Ce mouvement du tiroir est effectué par la tige *t*, qui traverse le côté de la boite à vapeur par un petit presse-étoupes, figuré sur la gravure. L'attache de la tige *t* et du tiroir se fait par un procédé spécial, qui laisse à la coquille une liberté suffisante pour qu'elle appuie bien sur la glace de distribution; à cet effet, la tige est vissée à un cadre de fer qui embrasse la partie supérieure du tiroir. Pour assurer un joint parfait, on place souvent un ressort entre la coquille et le couvercle de la chambre, bien que cette complication paraisse assez peu utile.

Les lumières doivent avoir une section suffisante pour que la vitesse de la vapeur dans les canaux d'admission ne dépasse pas 30 mètres par seconde ; cela correspond généralement à une section égale au 1/25 de celle du cylindre, ce qui est considérable. Or, il importe que le tiroir démasque rapidement la lumière et que de plus il suffise d'un faible déplacement pour obtenir ce résultat ; on a été conduit ainsi à donner aux lumières la forme d'un long rectangle, dont le petit côté est parallèle à la direction du mouvement du tiroir.

Quelquefois on munit le tiroir d'un double orifice et l'on partage chaque lumière en deux; il suffit alors d'un déplacement moitié moindre du tiroir: en multipliant les orifices on fait le tiroir *à grille*.

On a substitué souvent un tiroir *à tuyau* au tiroir à coquille; cet organe se compose d'un tuyau de fonte, deux

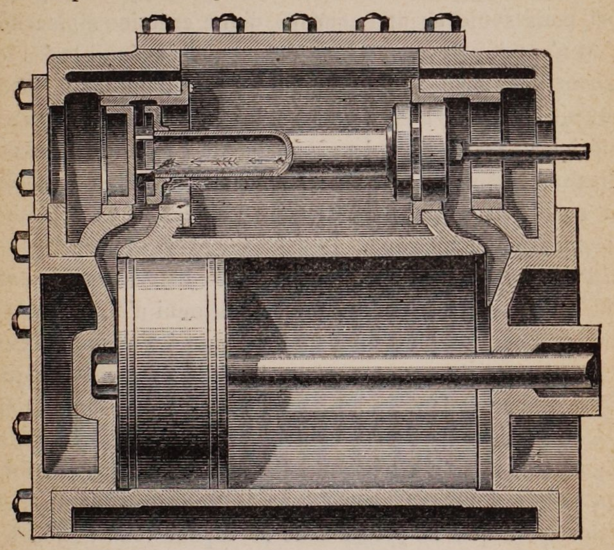
fois recourbé d'équerre, terminé par deux bases rodées, dont l'une d'elles repose toujours sur la lumière d'échappement ; la vapeur passe autour du tuyau pour accéder aux lumières et elle s'échappe par l'intérieur du tuyau. Ce dispositif diminue la grandeur des espaces nuisibles, mais il produit d'abondantes condensations de vapeur.

Les tiroirs en D ont été beaucoup employés autrefois ; ils se composaient d'une pièce creuse, mobile dans la boîte à vapeur, qui glissait sur la glace des lumières et s'y appliquait par ses deux extrémités ; cette pièce affectait la forme d'un ⊃ couché, ce qui justifiait leur nom. La vapeur qui remplissait la boîte circulait librement autour du tiroir, sans jamais pouvoir y pénétrer ; mais c'était par l'intérieur de ce tube, replié deux fois en équerre, que les lumières communiquaient avec le condenseur.

Watt avait essayé une autre forme de tiroir dite *à piston :* il était constitué par deux pistons, mûs par une tige unique, et formant double joint dans un cylindre placé contre le cylindre moteur. L'intervalle compris entre les pistons restait en communication avec le condenseur, tandis que la vapeur remplissait l'espace extérieur.

Ce genre de tiroir est encore utilisé dans les machines à grande vitesse et nous donnons ci-contre (fig. 25) le dessin du tiroir des machines Armington, construites par la Société alsacienne de constructions mécaniques. Il se compose d'un tube en fer portant à chaque extrémité une tête formant piston : ces deux pistons découvrent alternativement les deux lumières du cylindre. Leurs faces extérieures communiquent avec l'échappement, et l'espace compris entre eux est rempli par la vapeur arrivant de la chaudière. Chaque piston porte un orifice annulaire permettant de doubler les sections d'introduction de vapeur du cylindre ; lorsqu'une des arêtes intérieures vient découvrir une des lumières, l'arête intérieure de l'orifice annulaire du côté opposé communique avec la boîte et la vapeur trouve alors un second passage par

l'intérieur du tiroir. Grâce à cette disposition, on évite tout laminage de vapeur, malgré la grande vitesse de la machine : elle a de plus l'avantage de réduire la course du tiroir.



[Fig. 25. — Tiroir Armington à pistons cylindriques.

Dans les machines modernes, on tend à remplacer les tiroirs plans par des robinets cylindriques : tel est le cas des machines du genre Corliss. Le corps du distributeur est alors cylindrique et on lui fait découvrir les lumières en lui donnant un mouvement oscillatoire autour de son axe : la masse de fonte présente une profonde rainure, dans laquelle est engagée une large barre de fer méplat, terminée à son extrémité par un tourillon cylindrique, sur lequel est calée la manivelle de distribution. La disposition des cylindres Corliss, qui présentent quatre orifices distincts, deux d'admission et deux d'échappement, simplifie singulièrement la fonction de ces tiroirs cylindriques.

On est aussi revenu aux soupapes de distribution : ce sont

des soupapes coniques en bronze, reposant sur un siège de même forme, parfaitement rodé; on ouvre les orifices en soulevant le cône. Mais il faudrait développer un grand effort pour soulever une soupape d'une certaine dimension, si l'on n'employait le système des soupapes équilibrées de Cornouailles, formées d'un double siège et d'un double cône, recevant la vapeur latéralement et lui ouvrant un chemin par l'intérieur. Telles sont les soupapes des machines Sulzer, Colmann, Riedinger, etc. ; elles se conservent bien étanches, à la condition d'être parfaitement guidées et de retomber doucement sur leur siège.

Citons enfin, pour être complet, le distributeur rotatif de la maison Biétrix ; c'est un robinet muni d'ouvertures et de cloisons convenablement disposées, animé d'un mouvement de rotation uniforme et continu ; il est légèrement conique, pour rattraper le jeu produit par l'usure; la vapeur le tient ainsi constamment appuyé contre une butée extérieure, de telle sorte qu'il n'y ait pas d'autre frottement que celui des deux presse-étoupes traversés par la tige du robinet. Il est à remarquer que la pression de la vapeur tend toujours à décoller le boisseau du robinet dans lequel il tourne, ce qui garantit l'appareil contre le grippage. Nous avons vu, à l'Exposition de 1889, un distributeur en bon état après quatre ans de service continu.

VI. **Excentriques et coulisses.** — Le mouvement alternatif du tiroir est obtenu à l'aide d'un excentrique : ce mouvement est toujours limité à une faible élongation. L'excentrique convient mieux que les manivelles à ces petits déplacements, parce qu'on peut le placer en n'importe quel point de l'arbre, tandis que la manivelle ne peut être disposée qu'à son extrémité.

Un excentrique se compose d'un disque de fonte circulaire calé sur l'arbre de couche, entouré d'un collier de fonte ou plus souvent de bronze ; ce collier est muni d'un rebord, qui l'empêche de quitter le disque et qui a d'autre part l'avantage de retenir les huiles. Une portée, ménagée sur le

collier, reçoit la tige de commande du tiroir. Le disque est excentré par rapport à l'arbre : la tige prend exactement le même mouvement que si elle était attachée au bouton d'une manivelle dont le rayon serait égal à l'excentricité.

La ligne des centres de l'arbre du disque représente le bras d'une manivelle fictive. Il est à remarquer que le tiroir doit être à son point mort au moment où le piston du cylindre est au milieu de sa course ; la ligne des centres doit donc être perpendiculaire à la direction de la grande manivelle ; le calage de cette grande manivelle et de l'excentrique sont par conséquent à angle droit. En réalité, cet angle, compté dans le sens de la marche du volant, est toujours un peu plus grand que 90°, parce qu'on cherche à faire une certaine détente par le tiroir, ainsi que nous l'avons expliqué plus loin.

Si l'on voulait changer le sens de rotation de la machine, il serait nécessaire de faire prendre à la ligne des centres une position symétrique de la première : à chaque sens correspondrait donc une position déterminée de l'excentricité. On obtenait autrefois le changement de calage de l'excentrique, nécessité par le changement de marche de la machine, en disposant sur l'arbre de couche un excentrique fou, que l'arbre entraînait dans son mouvement par un butoir appuyant sur une saillie du disque ; il suffisait d'arrêter la machine et de tourner le disque d'un certain angle pour amener le butoir au contact d'une autre saillie, et la machine était prête à tourner en sens inverse ; mais un arrêt s'imposait. Stephenson obvia à cet inconvénient par l'invention de la coulisse qui porte son nom, et que nous allons décrire avec soin, en nous aidant de la figure ci-contre.

Deux excentriques E et E′ sont collés côte à côte sur l'arbre O, l'un étant disposé pour donner une rotation en avant, l'autre pour donner une rotation en arrière. Les deux tiges de ces excentriques sont réunies entre elles à leur extrémité par une pièce *ee′* en fer forgé, courbée suivant un arc de cercle dont le centre coïncide avec celui de l'arbre ;

cette pièce est évidée en son milieu : c'est la coulisse. Dans son évidement se trouve engagé un coulisseau *a*, lequel est attaché à la tringle de commande du tiroir A. Or, la coulisse peut être élevée ou abaissée par un levier à contrepoids *fcd*,

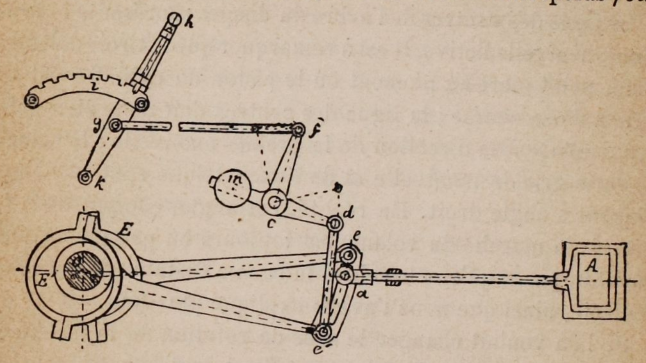


Fig. 26. — Coulisse de Stephenson.

et ce mouvement entraîne un déplacement relatif du coulisseau dans la coulisse : l'extrémité de la coulisse reliée à l'excentrique de marche en avant donne au tiroir le mouvement convenable à cette marche ; l'autre extrémité produit le mouvement qui détermine la marche en arrière. On n'a donc qu'à élever ou abaisser la coulisse pour changer le sens de rotation du moteur. Un déplacement de moindre importance a pour effet de modifier la distribution de vapeur ; mais nous avons déjà expliqué ce point quand nous avons fait l'étude cinématique des mouvements du tiroir. Pour le moment nous n'avons en vue qu'une description de mécanisme et ce qui précède suffit à cet objet.

Quand il veut relever la coulisse, le mécanicien n'a donc qu'à agir sur un levier : pour assurer la position de ce levier et l'empêcher de se déplacer de lui-même, on l'assujettit contre un arc de cercle muni de crans, dans lesquels s'engage un taquet d'arrêt ; ce taquet est soulevé par la main qui saisit la poignée du levier. Mais ce genre de relevage,

excellent pour les petites machines, serait dangereux pour les fortes machines, car le déclenchement nécessite alors un certain effort : aussi emploie-t-on dans ce cas une commande du levier par vis, qu'on manœuvre en faisant tourner un volant : l'effort à développer est moindre, mais il faut reconnaître que le mouvement du levier est ralenti.

Au lieu d'être ouvertes, les tiges de la coulisse peuvent être croisées; pour les bielles droites, la concavité de la coulisse était tournée vers l'arbre, tandis qu'elle est tournée en dehors, quand les bielles sont croisées. Telle est la disposition de la coulisse de Gooch, dans laquelle la coulisse est fixe, le coulisseau étant seul mobile ; la tige du tiroir demande alors à être articulée en son milieu.

VII. **Régulateur.** — Pour qu'une machine à vapeur garde une vitesse uniforme, il faut que le travail moteur soit toujours égal au travail résistant; il est donc nécessaire que la vapeur afflue au cylindre en proportion des résistances que la machine doit surmonter.

On peut régler cette proportionnalité par le robinet de prise de vapeur et de mise en marche : en l'ouvrant plus ou moins, on augmente ou l'on diminue la quantité de vapeur admise ; mais ce modérateur doit être manœuvré à la main et il ne résout la question que d'une manière incomplète, car on ne saurait suivre ainsi les variations incessantes du travail moteur et du travail résistant.

Ce qu'il faut, c'est un appareil automoteur, agissant de lui-même sur l'admission de vapeur; le type de ces appareils est le régulateur à boules inventé par Watt et breveté en sa faveur dès l'année 1774. Il se compose de deux sphères métalliques, fixées à des tiges, articulées sur un arbre vertical participant au mouvement de la machine; ces boules sont reliées par des tringles à une douille glissant le long de l'arbre et portant une gorge, qui est embrassée par un levier à fourchette. De la vitesse de rotation de l'appareil dépend la position des boules et par suite celle de la douille

et de la fourchette; une augmentation de vitesse fait écarter les boules en vertu de la force centrifuge, et monter la douille; le contraire a lieu quand la vitesse diminue. Or, le levier conduit une tringle, agissant sur une valve placée sur la conduite de vapeur; les liaisons sont telles, que cette valve se ferme quand les boules montent, et s'ouvre quand elles descendent.

Le régulateur porte bien son nom, car il règle la vitesse à un régime uniforme, en luttant à la fois contre les variations de puissance, généralement minimes, et contre les perturbations apportées dans la résistance par un embrayage ou un débrayage d'outils ou par une augmentation du travail qui leur est demandé individuellement. Il aide l'action du volant et lui permet de maintenir une vitesse moyenne d'une période à une autre, ce que le volant ne saurait faire de lui-même.

Ce serait une exagération et une erreur de prétendre que le régulateur maintient une constance absolue de la vitesse; mais il limite les variations de la vitesse. En effet, à chaque vitesse correspond une position des boules et, partant, de la douille et de la valve; une augmentation de deux tours ferme, par exemple, entièrement la valve, tandis qu'une augmentation de deux tours l'ouvre en plein : une variation de vitesse est donc possible, car la vitesse de régime varie avec la position des boules; c'est une imperfection essentielle à la disposition et au jeu de l'appareil. On a cherché à la corriger en inventant des appareils dont la vitesse d'équilibre fût la même, quelle que serait la position de la douille et du levier qu'il commande: ces appareils, qui ont fait l'objet de nombreuses recherches, constitueraient des *régulateurs isochrones*.

Le calcul a donné une solution : on démontre en effet qu'une boule de régulateur sera en équilibre pour une vitesse déterminée en tous les points d'une parabole dont l'axe est confondu avec celui du régulateur. Cette trajectoire para-

bolique étant difficile à réaliser[1], Farcot eut l'idée d'une heureuse simplification, en remplaçant la parabole par son cercle osculateur dans la position moyenne des boules, et il créa le régulateur à *bielles croisées* qui est à peu près isochrone, car il se trouve presque en équilibre dans toutes ses positions, pour une seule valeur de la vitesse de rotation. Les points d'attache des bielles ne sont plus sur l'axe, mais de l'autre côté de l'axe par rapport aux boules.

L'isochronisme plus ou moins approché a été réalisé de bien des manières différentes : on a employé des contre-poids, des masses auxiliaires, des ressorts, des boules conjuguées, des ailettes, etc. ; nous ne saurions entreprendre de décrire les artifices variés auxquels on a eu recours pour essayer de perfectionner les régulateurs et nous nous contenterons d'indiquer quelques solutions plus intéressantes du problème. Porter a chargé la douille d'un manchon pesant, de telle sorte que, si A est le poids des sphères et B celui de cette masse auxiliaire, la force centrifuge interviendra par A contre la pesanteur dont l'effet est $A + 2B$, car le chemin parcouru par la douille est double du déplacement vertical des sphères : le régulateur est dès lors rendu plus sensible. Prœll a eu l'idée de renverser le dispositif habituel et les boules tournent en l'air au lieu de pendre ; cet appareil est relativement très puissant. Andrade relie les bras, qui portent les boules, par un losange articulé, dont le sommet est fixe, tandis que le point inférieur est attaché sur la douille mobile ; les deux points d'articulation latéraux glissent librement dans des fenêtres découpées dans les bras. Dans le régulateur de Buss, dit régulateur *cosinus*, dont on voit une élévation et une coupe dans les figures 27 et 28, le moment de la force centrifuge est proportionnel au cosinus de l'angle qui fait, avec l'axe de rotation, une droite allant du centre de

[1] Francke y a réussi néanmoins en employant des guides paraboliques.

gravité de l'ensemble des boules au point de suspension des bras : l'appareil se compose de deux paires de boules, dont les tiges, attachées à l'extrémité d'un bras très court, font entre elles un angle invariable. Elles commandent le manchon au moyen d'un coulisseau fixé au bout d'un bras de levier. Notre dessin montre de quelle façon le régulateur agit sur l'admission de la vapeur, en soulevant plus ou moins une soupape équilibrée disposée sur le chemin de la vapeur.

Tous ces appareils sont très ingénieux et fort bien conçus ; toutefois nous dirons avec M. Léauté, qui a publié de savantes études sur la question, que ces dispositifs peuvent présenter des avantages spéciaux, mais qu'en somme ils ne sont pas réellement supérieurs à l'appareil primitif et simple de Watt.

Quand un régulateur isochrone agit avec rapidité et ne rencontre que peu de résistance de frottement, il arrive fréquemment que la force vive de ses pièces en mouvement les emporte au delà de leur position d'équilibre : il en résulte alors une série périodique d'oscillations autour de sa position d'équilibre stable, qui est très nuisible à la bonne marche du moteur. On évite ces oscillations au moyen d'un piston se mouvant dans un cylindre à huile ou à air, dont la résistance ralentit l'action du régulateur.

Mais il est assez illogique d'imposer au régulateur ce travail supplémentaire, qui le paralyse, dans le but de le rendre plus exact. Aussi, préférons-nous à cette solution celle qui a été imaginée par M. Denis.

Le régulateur Denis est construit par la Société centrale de constructions de machines (Weyher et Richemond) ; la figure 29 ci-après, que nous devons à l'obligeance de MM. les administrateurs, permet de se rendre compte de son fonctionnement. C'est, à vrai dire, un compensateur qui peut être adjoint à n'importe quel régulateur, et qui peut s'adapter à tous les genres de machines. Il supprime, d'une façon absolue, l'intervention de la main du mécanicien pour conserver au

moteur une vitesse rigoureusement constante dans toutes les conditions de résistance et de puissance.

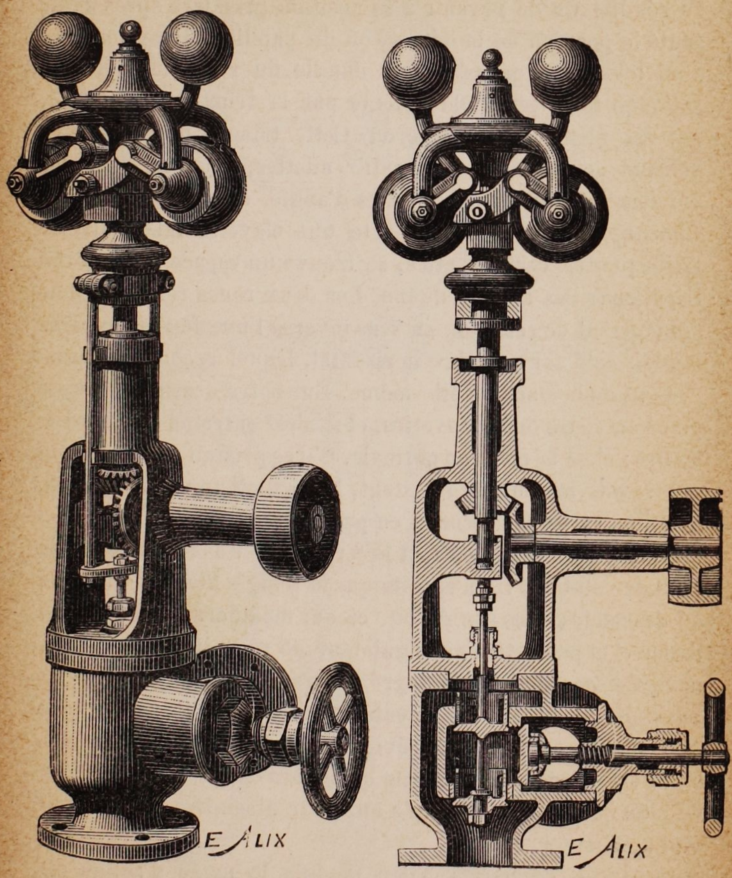


Fig. 27. — Régulateur cosinus de Buss.

Fig. 28. — Coupe du régulateur cosinus.

Au lieu d'être relié d'une manière invariable avec l'organe (détente ou papillon) chargé de modifier l'admission de vapeur, l'appareil Denis est indépendant du régulateur et de

cet organe, et il laisse au premier toute sa liberté et l'instantanéité de son action, n'ayant d'autre objet que de permettre au régulateur de revenir à sa position première après avoir réglé la position de la détente ou du papillon. Il se compose d'un levier *a*, appuyé sur la douille du régulateur, lequel actionne le levier *d* de détente par la tringle verticale *b*, qui est filetée dans un écrou. Cette tringle porte un toc, marqué en *e*, muni de quatre ailettes, glissant dans les douilles alésées de deux roues d'angle, dont l'une est en *c*. Chacune de ces douilles porte une clavette intérieure en saillie; entre ces clavettes, se trouve un espace libre égal à l'épaisseur des ailettes du toc. Les deux roues reçoivent leur mouvement de rotation, en sens inverse l'une de l'autre, d'un pignon calé sur un arbre horizontal, lequel reçoit son mouvement de la machine elle-même. Sur notre dessin, le toc est placé entre les deux clavettes, et il n'est entraîné par aucune d'elles; c'est la position normale. S'il se produit une variation du travail moteur ou résistant, le régulateur va changer de position et le toc viendra en prise avec l'une ou l'autre des clavettes qui l'entraînera, et le fera tourner avec lui dans son sens de rotation. Il en résulte que la tringle filetée *b* montera ou descendra dans son écrou, ce qui modifiera la position du levier *d* et permettra au régulateur de revenir à sa position normale sans modifier le degré d'ouverture du papillon ou la position du butoir de détente. Le régulateur ayant repris sa position moyenne, il est évident que la vitesse de la machine est exactement la même qu'auparavant. On remarquera de plus que le régulateur n'a eu, pour ainsi dire, aucun travail à effectuer.

En 1834, Zacharias Allen modifia le mode d'action du régulateur; au lieu de lui faire mouvoir une valve de vapeur, il lui imposa la commande de la détente. Depuis lors, le régulateur a été adapté à un grand nombre de systèmes de détente, dans lesquels son action est quelquefois fort compliquée et surtout fort chargée; c'est, en effet, tout autre

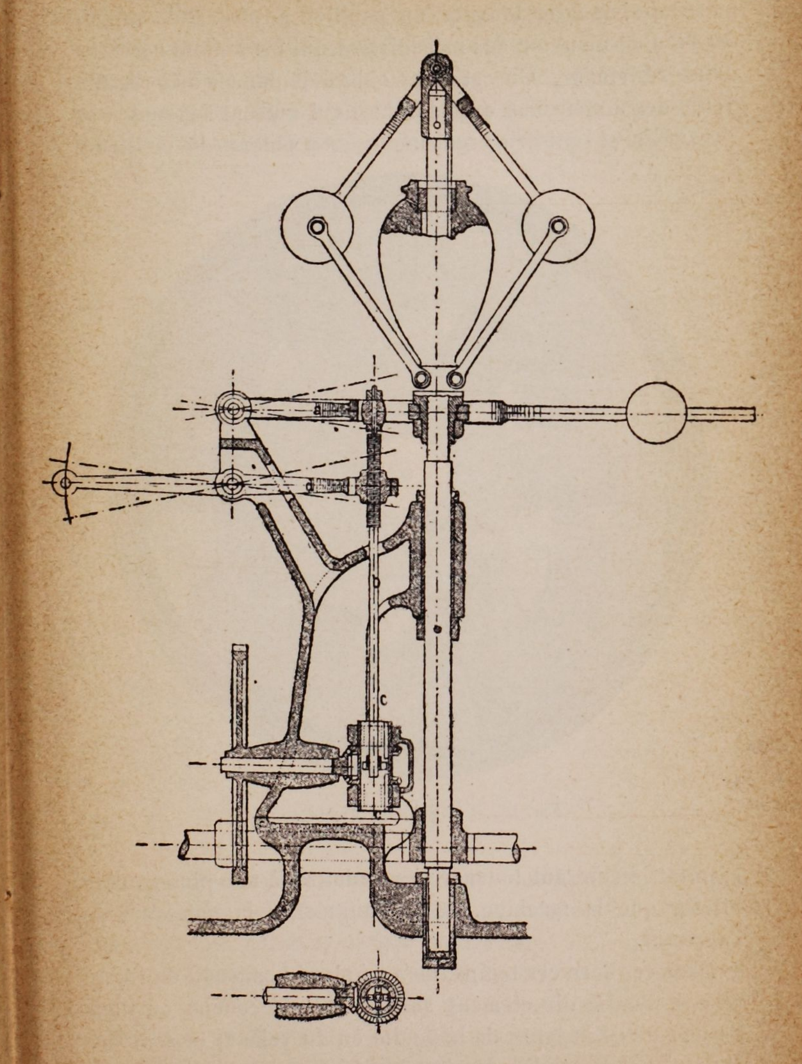


Fig. 29. — Compensateur du régulateur Denis.

chose que de faire tourner un papillon noyé dans la vapeur ou bien de mouvoir des mécanismes qui présentent une certaine résistance. On est alors obligé de donner aux régulateurs des dimensions considérables qui nuisent souvent à sa sensibilité et sont peu gracieuses : on a obtenu de meilleurs

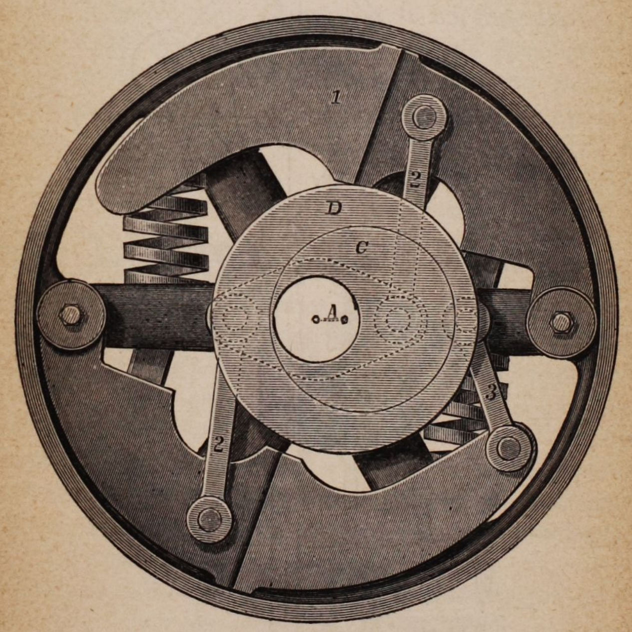


Fig. 30. — Régulateur Armington.

résultats en faisant tourner le régulateur à une plus grande vitesse que la machine, ce qui augmente la puissance de l'appareil.

Dans ces derniers temps, on a employé beaucoup de régulateurs montés directement sur l'arbre de couche ou dans l'intérieur de la jante de la poulie ou du volant; ce sont des appareils susceptibles de changer de forme avec la vitesse de la machine et dont on utilise les modifications pour ré-

duire l'admission et augmenter la détente : on trouve dans ces régulateurs de lourdes masses, d'énergiques ressorts et des freins à huile ou à graisse dont l'objet est d'empêcher les oscillations des pièces autour d'une position d'équilibre instable. Tels sont les régulateurs Turner, Phénix, Perrins, etc. ;

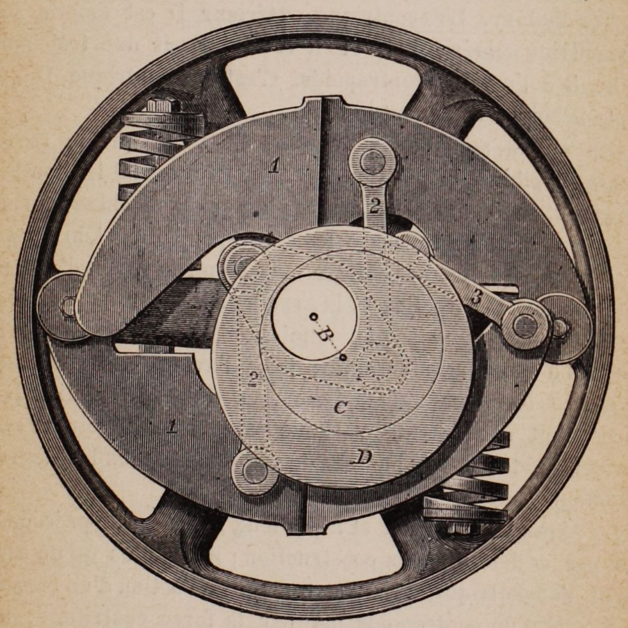


Fig. 31. — Régulateur Armington à l'arrêt.

ils conviennent spécialement aux machines à grande vitesse : leur principal avantage est d'être puissants et de pouvoir entraîner des mécanismes fort résistants.

Comme exemple, nous citerons le régulateur des machines Armington, construites par la Société alsacienne de constructions mécaniques. Nous voyons sur la figure 30 que l'excentrique calé sur l'arbre moteur et chargé de la commande du tiroir se compose de deux parties : un excentrique

intérieur C et un excentrique extérieur D. Le premier est venu de fonte avec une douille à oreilles : il est fou sur l'arbre moteur; les deux oreilles sont reliées par les bielles *2* à des contrepoids *1*, mobiles autour de tourillons fixés au bras du volant; de forts ressorts à boudin les ramènent vers l'axe de l'arbre moteur. L'excentrique extérieur D est mobile sur l'excentrique intérieur C et il est relié par une troisième bielle *3* à l'un des contrepoids. C'est l'excentrique D qui porte le collier attaquant le tiroir.

Ces pièces sont combinées de telle sorte que le rayon d'excentricité ait la position OB (fig. 31), quand les contrepoids sont au voisinage du centre ; lorsque la machine tourne, la force centrifuge repousse les contrepoids dans leurs positions extrêmes ; pour la vitesse maximum, le rayon d'excentricité prend la direction et la grandeur OA. Or, la première position correspond à une admission aux 7 dixièmes, la seconde à une admission nulle ; mais l'avance est constante pour tous les degrés d'admission. Ce dispositif réalise par conséquent une détente variable par un seul tiroir, et elle permet d'obtenir, par l'action du régulateur, tous les degrés de détente.

Le régulateur Garnier et Lecouteux ne diffère du précédent que par les détails de sa construction ; il n'a plus qu'un seul corps d'excentrique et se trouve soumis à l'action d'un ressort et à celle d'un contrepoids mû par la force centrifuge ; un frein à graisse semi-fluide forme cataracte et empêche des mouvements trop rapides. Pendant la marche, le contrepoids s'éloigne du centre et tend le ressort ; l'excentricité diminue quand la vitesse augmente.

Citons enfin pour mémoire les régulateurs hydrauliques et pneumatiques, à pompe, dans lesquels la machine refoule de l'eau ou de l'air dans un réservoir. L'huile s'en échappe par une ouverture réglée; quand la vitesse augmente, cette ouverture ne suffit plus et le fluide fait remonter un plongeur ou un piston, qui diminue le travail moteur en agissant sur un pa-

pillon ou sur un appareil de détente. Tels sont les régulateurs Cody, Dunlop, Molinié, Larivière, qui ont eu en leur temps d'ingénieuses applications, mais auxquels on renonce presque entièrement aujourd'hui.

VIII. **Condenseur.** — Nous avons démontré précédemment la nécessité de refroidir la vapeur au contact d'un réfrigérant, pour fermer le cycle d'opérations aboutissant à la transformation du calorique en travail. On peut se contenter de jeter la vapeur dans l'air, mais il est mieux de la lancer dans une caisse, refroidie par un jet d'eau, où elle se condensera plus complètement et plus rapidement ; enfin, ce sera un heureux perfectionnement que de faire d'abord le vide dans cette caisse, de manière à abaisser le plus possible la température de la vapeur qui y pénètre. On arrive de la sorte à n'avoir derrière le piston qu'une contrepression de 1 à 2 dixièmes d'atmosphère. C'est ainsi que Watt a été conduit à créer son condenseur.

Un condenseur se compose d'une enceinte refroidissante, d'une soupape d'injection, d'une pompe à air, faisant le vide, et d'une pompe à eau, pour alimenter l'injecteur : ce dernier accessoire deviendrait inutile au cas où l'on puiserait l'eau à deux ou trois mètres seulement de profondeur, car la pompe à air suffirait à la tâche dans ces conditions.

La disposition de ces divers éléments peut varier beaucoup ainsi que leur forme : on emploie des condenseurs verticaux ou horizontaux, cylindriques ou à section quadrangulaire ; l'injection se fait par une gerbe conique, partant du fond, quand le condenseur est vertical, ou par un pulvérisateur d'eau horizontal dans les autres cas. On cherche toujours à augmenter l'étendue des contacts entre l'eau froide et la vapeur, et dans ce but on établit quelquefois des nervures ou des ailettes dans la caisse.

La pompe à air peut aussi être verticale ou horizontale : il importe que le piston soit toujours recouvert d'eau. Les clapets de la pompe à air sont disposés à droite et à gauche

du cylindre ; on les fait en caoutchouc vulcanisé de 15 millimètres d'épaisseur et on les laisse battre sur un grillage, pour les soutenir. On emploie aussi quelquefois des clapets métalliques circulaires, très légers, maintenus par de faibles ressorts. La pompe élévatoire s'emploie quand la hauteur d'ascension dépasse quatre mètres, mais on s'en passe le plus souvent ; il faut alors avoir soin de produire le vide dans le condenseur avant la mise en train du condenseur, en envoyant pendant quelques instants la vapeur à l'air libre, ou encore en dirigeant dans le condenseur un jet de vapeur qui balaie l'air et se condense en produisant un vide relatif.

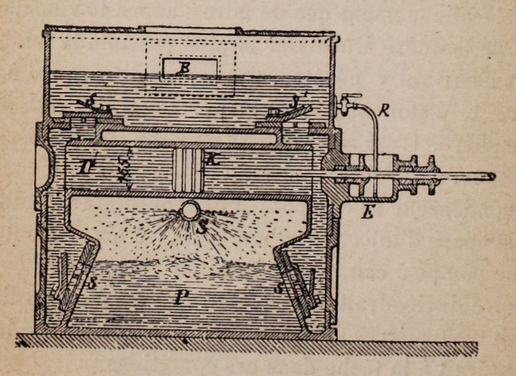


Fig. 32. — Coupe du condenseur.

La figure 32 montre la disposition des organes du condenseur : P est la bâche de condensation, dans laquelle s'opère le contact de la vapeur de décharge avec l'eau d'injection, admise par S ; K est le piston de la pompe à air ; c'est enfin par B que s'écoule l'eau chaude. Pour nous rendre compte du fonctionnement de cet appareil, supposons que le piston K aille de gauche à droite ; il aspire donc derrière lui l'eau de la vapeur dans la bâche, par le clapet inférieur de gauche S, en même temps que, par sa face antérieure, il refoule le liquide dans la chambre d'évacuation à travers le clapet supérieur de

droite S′. L'eau s'échappe par B dans un canal vertical, accolé contre le condenseur, et elle est généralement jetée au ruisseau ; on l'utilise quelquefois pour donner aux ouvriers des bains gratuits, et c'est là assurément une excellente pratique, assez répandue dans le Nord de la France, et très recommandable au double point de vue de la propreté et de l'hygiène.

Le condenseur que nous venons de décrire est un *condenseur à injection;* c'est celui qu'on emploie le plus ordinairement dans l'industrie pour les machines fixes. Mais quand les eaux sont trop incrustantes pour la conservation des chaudières (c'est le cas des machines marines, qui ne peuvent être alimentées à l'eau de mer), on donne la préférence aux *condenseurs à surface.* On fait alors déboucher le jet de vapeur de décharge sur un faisceau tubulaire de grande surface traversé incessamment et, par suite, continuellement refroidi par un courant d'eau : la vapeur se condense au contact du métal et l'eau ainsi produite est reprise par une pompe d'extraction et renvoyée à la chaudière; c'est en réalité de l'eau distillée.

La surface des tubes doit être considérable; nous l'estimons aux 3/4 de la surface totale de chauffe de la chaudière; le poids de l'eau de circulation sera au moins égal à 40 fois le poids de vapeur pris à la chaudière.

Pour assurer aux tubes une libre dilatation et pour faciliter leur réparation et leur nettoyage, on les assemble dans des plaques tubulaires de bronze à emboîtement conique, et on fait les joints par des bagues de bois : le bois doit être tendre afin qu'il se mouille aisément et donne un bon joint en se gonflant.

La condensation par surface est la plus satisfaisante au point de vue théorique, puisque c'est le seul moyen de fermer rigoureusement le cycle et de fonctionner avec la même quantité d'eau; mais elle a un grand inconvénient pour les chaudières, car elle y ramène toutes les graisses employées

pour la lubréfaction du cylindre; or, ces matières produisent des acides gras, qui corrodent le fer et les tôles; de plus, ces accumulations de substances mal conductrices peuvent être la cause de sérieux coups de feu. On atténue ces défauts du système de condensation en n'employant que des huiles minérales extraites du pétrole, qui ne se saponifient pas; on utilise quelquefois aussi des appareils à rotation rapide pour éliminer les corps gras de l'eau condensée par la force centrifuge.

Les condenseurs à eau, qu'ils soient à injection ou à surface, exigent au moins 250 litres d'eau par cheval et par heure; si l'usine est située sur le bord d'une rivière, on n'hésite pas à effectuer de la condensation, parce qu'elle fait réaliser au moins 25 pour 100 d'économie de combustible; s'il faut chercher l'eau au loin ou profondément, on hésite et souvent on y renonce. C'est alors le cas d'employer un *aéro-condenseur*.

Ces appareils refroidissent et condensent la vapeur par un courant d'air; on se heurtait, il est vrai, à de sérieuses difficultés provenant de la faible capacité calorifique du gaz et à la dépense nécessitée par la mise en mouvement de grandes masses de gaz. Il ne faut pas oublier, en effet, qu'une même paroi laissera passer 1000 calories par mètre carré, par heure et par degré d'écart, si elle est baignée d'eau, tandis qu'il n'en passera plus que 12 si l'eau est remplacée par l'air. Mais les inventeurs ont appliqué à l'aéro-condensation des ventilateurs si bien étudiés, qu'il a été possible de mettre en mouvement d'énormes masses de gaz sans trop de frais. L'exemple suivant en est la preuve: nous l'empruntons à un mémoire de M. Fouqué, présenté au Congrès international de mécanique appliquée. Dans une expérience, il a été condensé par heure 329 kilogrammes de vapeur avec un vide de 46 centimètres de mercure; l'air, pris à 24°, était rejeté à 48°, et le débit atteignait 25.300 mètres cubes; le travail dépensé de la sorte était de 1,75 cheval, ce qui correspond à

un travail de 1 cheval pour 188 kilogrammes de vapeur condensée. Quand l'air est humide, le rendement est meilleur et le travail de 1 cheval condense 330 kilogrammes de vapeur. Ces appareils méritent d'être pris en sérieuse considération : ils sont spécialement à recommander dans les lieux où l'eau est rare et dans les industries où l'on peut utiliser l'air chaud.

Le problème de la condensation admet encore une autre solution dans les cas de pénurie d'eau : elle consiste à opérer sur une masse d'eau limitée, qu'on fait circuler continûment entre le condenseur et un appareil spécial de réfrigération ; ce réfrigérant devra donc faire perdre au liquide au moins autant de calories qu'il n'en a gagné au condenseur. C'est dire qu'il faut lui donner une grande puissance, c'est-à-dire une grande surface, attendu que le refroidissement s'obtient toujours par rayonnement. On utilise le plus souvent à cet effet des bassins, dans lesquels l'eau tombe en cascade, soit sur des rochers, soit sur des fagots ou encore sur de grandes fontaines à vasques superposées. MM. E. et P. Sée, de Lille, ont eu l'ingénieuse idée de créer des jets d'eau, dans lesquels la pulvérisation du liquide produit une évaporation considérable, et partant un abaissement de température rapide et notable ; on prétend que le travail dépensé pour la création des gerbes d'eau est facilement récupéré par l'augmentation de rendement de la machine.

On applique sur les condenseurs un manomètre *à vide* qui permet de suivre leur marche : nous avons calculé les éléments du tableau ci-dessus pour permettre de passer des indications de pression de l'appareil aux températures de condensation.

TEMPÉRATURE	PRESSION EN M/M DE MERCURE	PRESSION EN ATMOSPHÈRES
33°,3	38,0	0,050 = 1/20
35°,0	41,8	0,055
37°,4	47,5	0,062 = 1/16
40°,0	55,0	0,072

TEMPÉRATURE	PRESSION EN M/M DE MERCURE	PRESSION EN ATMOSPHÈRES
42°,7	63,3	0,083 = 1/12
45°,0	71,4	0,094
46°,2	76,0	0,100 = 1/10
50°,0	92,0	0,121
50°,6	95,0	0,125 = 1/8
53°,3	108,6	0,143 = 1/7
56°,6	127,0	0,167 = 1/6

Les manomètres métalliques pourront, grâce à ces indications, toujours être contrôlés par un thermomètre, ce qui n'est point inutile.

CHAPITRE VIII

TYPES DE MACHINES

Après avoir posé les bases d'une théorie générique et expérimentale des machines à vapeur et avoir étudié le moteur dans ses dispositions classiques, il nous reste à décrire les types de machines les plus connus et les plus répandus dans l'industrie.

Ce n'est pas la partie la moins délicate de notre tâche, parce que nous n'avons pas la prétention d'être complets et que les dimensions de cet ouvrage nous imposent des limites, que nous ne saurions franchir; nous devons forcément omettre de décrire un grand nombre de solutions ingénieuses, dont nous aurions été heureux de faire ressortir les avantages spéciaux. En exprimant nos regrets à cet égard, nous espérons que ceux qui auront été, non point oubliés, mais passés sous silence, voudront bien nous le pardonner.

Ce sont les machines actuellement existantes en France que nous nous proposons de faire connaître surtout dans ce

chapitre ; la plupart d'entre elles ont figuré à l'Exposition universelle de 1889 et les récompenses qu'elles ont obtenues à ce grand concours international, sont une preuve de leur valeur et du mérite de ceux qui les ont créées. Des figures nous permettront de peindre aux yeux les dispositifs d'ensemble d'un certain nombre de types : pour les autres, nous nous efforcerons d'être aussi clairs que possible dans nos descriptions.

I. **Machine à balancier de Watt.** — C'était une belle machine que celle qu'on construisait au commencement de ce siècle : elle était sortie de toutes pièces des mains de Watt et elle présentait presque tous les traits essentiels de la machine à vapeur moderne. L'illustre inventeur n'avait guère laissé à ses successeurs d'autre soin que d'améliorer son œuvre dans les détails, et de développer les principes fondamentaux qu'il avait posés. Il ne faut dès lors point s'étonner que la machine à balancier ait conservé si longtemps la faveur des industriels intelligents ; elle avait une régularité de marche parfaite, une stabilité admirable, et elle exigeait peu d'entretien ; il existe aujourd'hui encore des machines à balancier qui sont en service depuis plus de soixante ans.

En 1830, on relevait couramment des consommations de 7 kilogrammes de charbon par cheval-heure effectif pour des machines de 70 chevaux ; c'est le résultat moyen qui ressort des expériences faites à Auzin sur huit machines d'épuisement[1], la tension de la vapeur ne dépassant pas $1^{kg},25$. Quand on se décida à élever la pression à 5 kilogrammes, la détente put être prolongée et la dépense s'abaissa à 3 kilogrammes par cheval-heure : on obtint mieux encore par l'application des détentes variables par le régulateur. L'emploi des deux cylindres de Woolf, qui est si facile dans les

[1] Poncelet signale ces chiffres dans son *Cours de mécanique appliquée aux machines*, t. II, p. 249.

types de machines à balancier, conduisit enfin à des consommations de 1,5 à 2 kilogrammes.

Les figures 33 et 34 permettent de juger de l'ensemble et des détails d'une semblable machine.

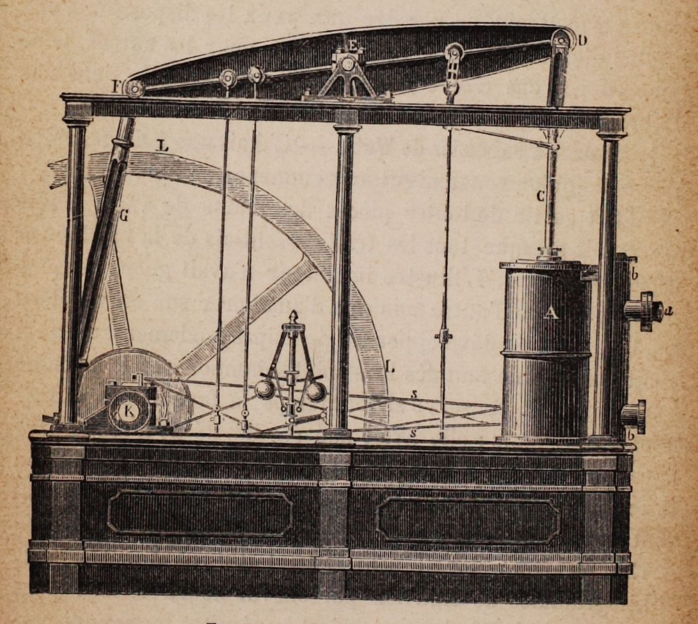


Fig. 33. — Machine à balancier.

Le balancier en fonte (Watt le fit longtemps en bois armé) est porté par deux paliers E, fixés sur un entablement, soutenu par des colonnes au nombre de six ; le bâti, servant de piédestal à l'ensemble, avait un caractère architectural, qui plaisait aux ingénieurs de l'époque, parce qu'ils trouvaient ainsi le moyen de donner aux machines un aspect monumental, expression de leur stabilité. La bielle G se faisait le plus souvent en fonte à nervures saillantes ; l'arbre K était lui-même en fonte, et cela n'était pas absolument condamnable pour des moteurs à marche lente.

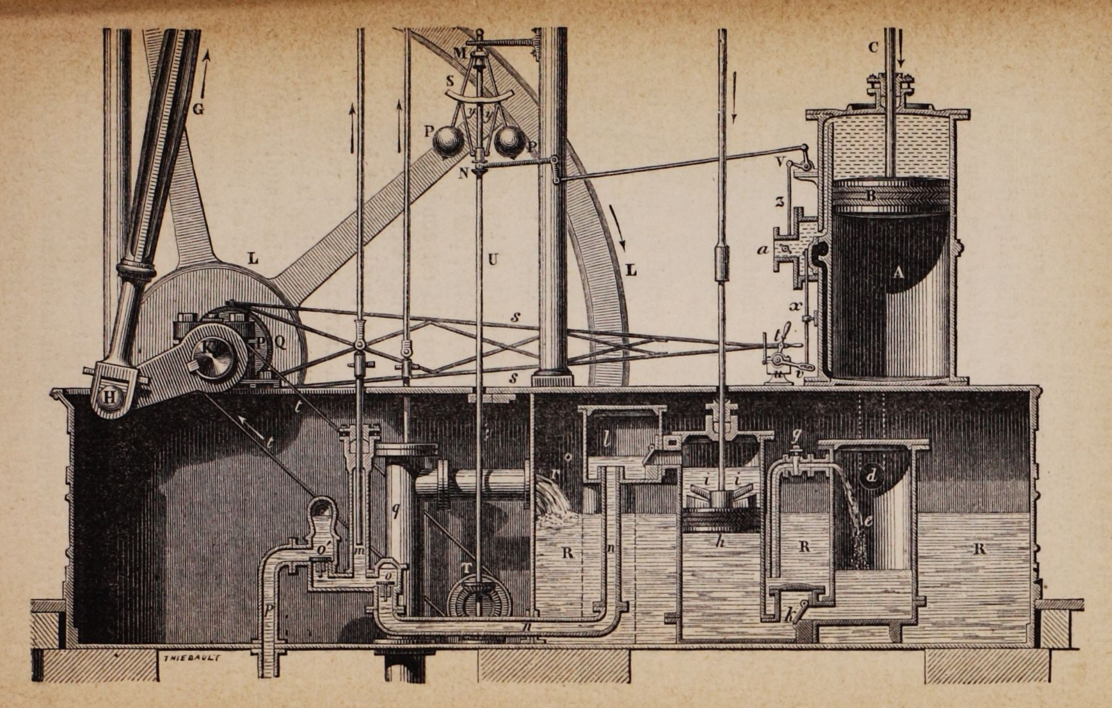


FIG 34 — Coupe d'une machine à balancier.

La tige du piston C est guidée à sa sortie du cylindre par un long presse-étoupes, qui lui assure une course rectiligne; la liaison de cette tige avec le balancier est opérée par le parallélogramme de Watt; on peut installer dans une semblable machine autant de tiges guidées que l'on veut, soit que l'on juxtapose deux cylindres, soit qu'on actionne ainsi la pompe à air. L'excentrique commande le tiroir par la tige à tringles S ; le mouvement horizontal de va et vient est transformé en un mouvement vertical par un levier coudé à bras égaux. Le tiroir représenté sur la figure 34 est composé d'un fourreau creux portant à ses deux bouts des patins glissant sur la table, et mettant alternativement chaque lumière en communication avec la chaudière ou le condenseur.

Une courroie Z relie l'arbre de couche à un arbre intermédiaire donnant le mouvement au régulateur, dont le manchon commande par une fourche la valve d'admission. L'emploi d'une courroie est critiquable en principe, mais on peut l'admettre dans une machine à marche lente.

Le condenseur est caché dans le bâti et les fondations. La vapeur est prise, à sa sortie du cylindre, par le conduit *d* et elle débouche dans la bâche *e*, où elle est condensée par une pulvérisation d'eau froide. Le mélange d'eau et de vapeur passe de la bâche à la pompe à air, par le clapet *k*, puis elle est élevée par le piston, en traversant les valves *i*, au niveau *l* dans une bâche auxiliaire, où puise la pompe d'alimentation *m* pour maintenir le niveau de la chaudière.

L'eau froide nécessaire à la condensation est prise dans un grand bassin, qui enveloppe les bâches et le condenseur ; elle est tirée des puits ou d'un cours d'eau, par la pompe *q*.

Cet ensemble est fort bien combiné pour permettre l'accès de toutes les parties de la machine, au moins des parties essentielles ; un escalier et une plate-forme permettent au mécanicien d'atteindre au niveau du balancier. L'espace occupé dans le plan horizontal n'est pas exagéré, mais ces machines

doivent être montées dans un batiment spécial. Leurs poids est considérable ; il contribue du reste à la régularité de la marche.

II. **Machine verticale à connexion directe.** — Un balancier était bien lourd pour les machines de faible puissance : on dut

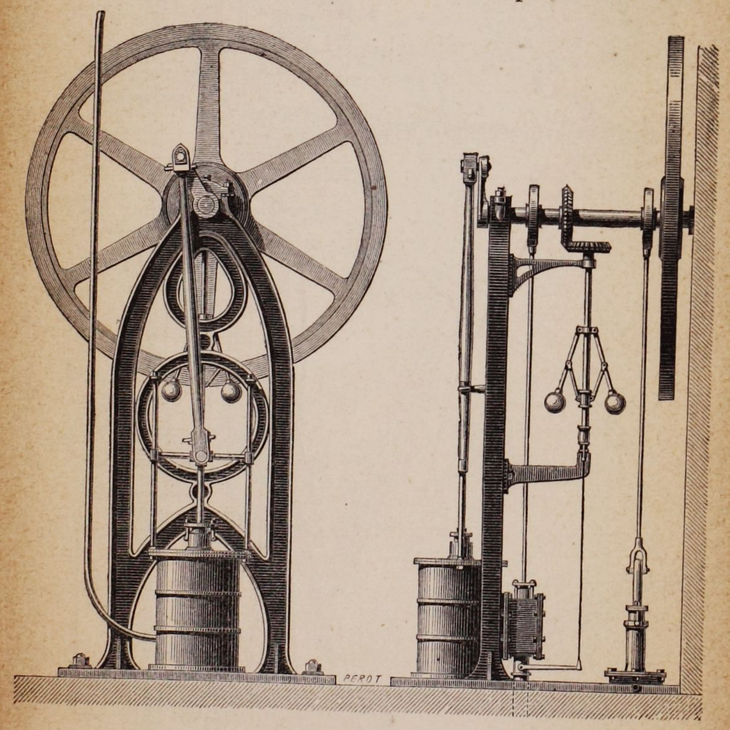


Fig. 35. — Machine verticale à connexion directe.

chercher rapidement à le supprimer. Nous avons énuméré, dans notre classification, les dispositifs divers auxquels on recourut d'abord ; on ne trouva pas tout de suite la solution la plus simple, et l'on imagina des bielles de retour, de doubles bielles, des cadres, des cylindres oscillants, qui

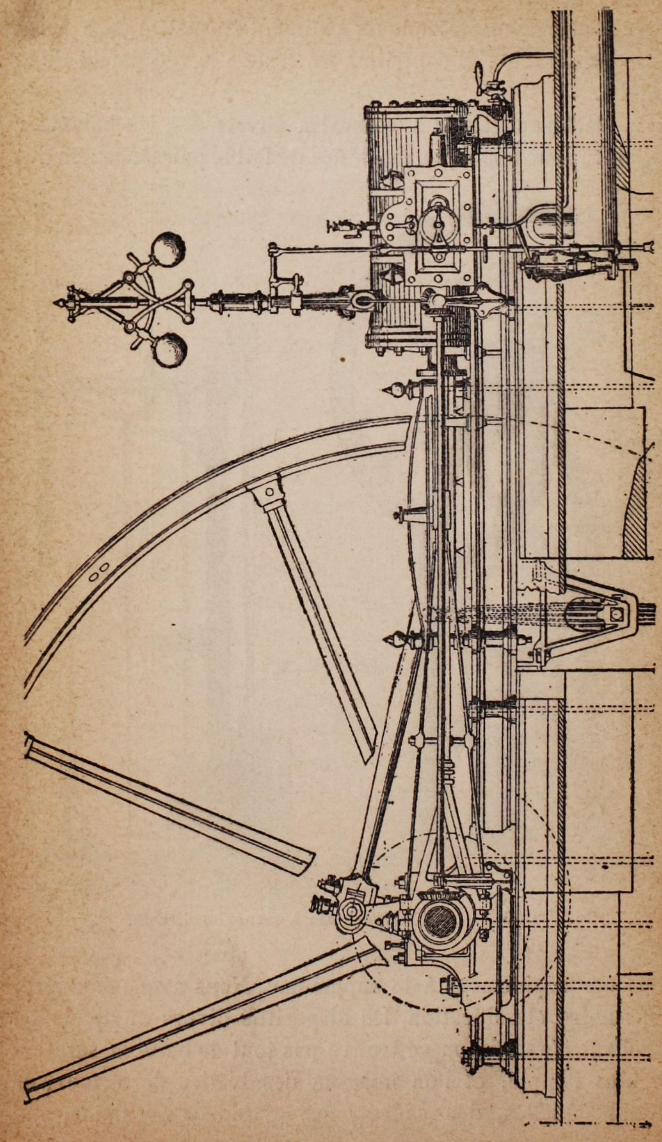


Fig. 36. — Machine Farcot.

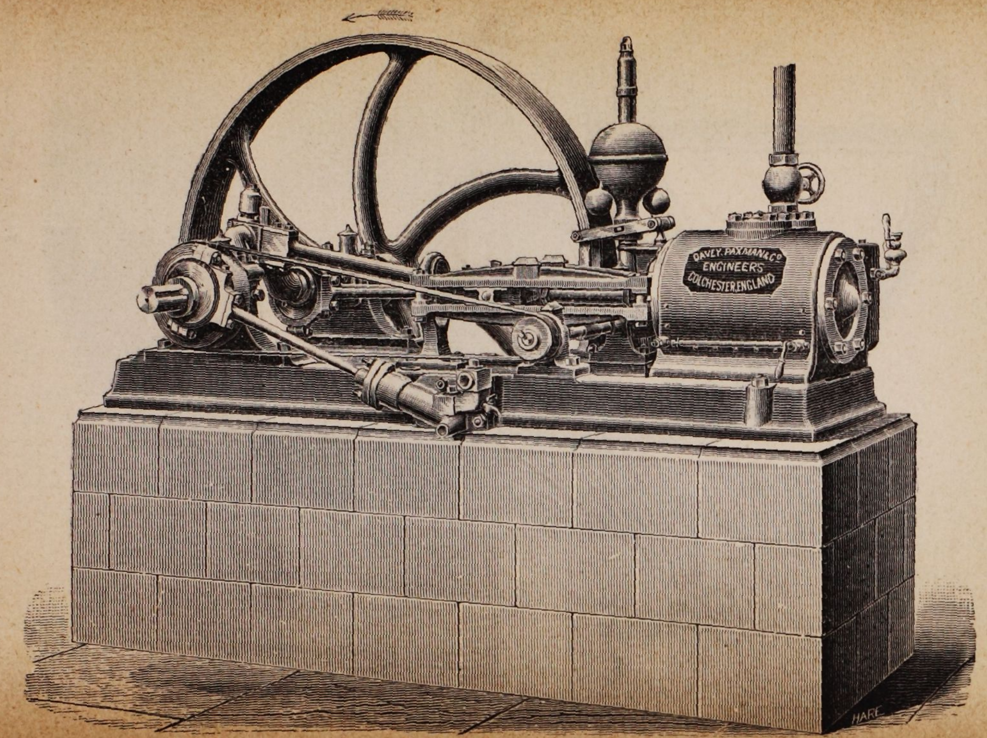


FIG. 37. — Machine Davey-Paxman.

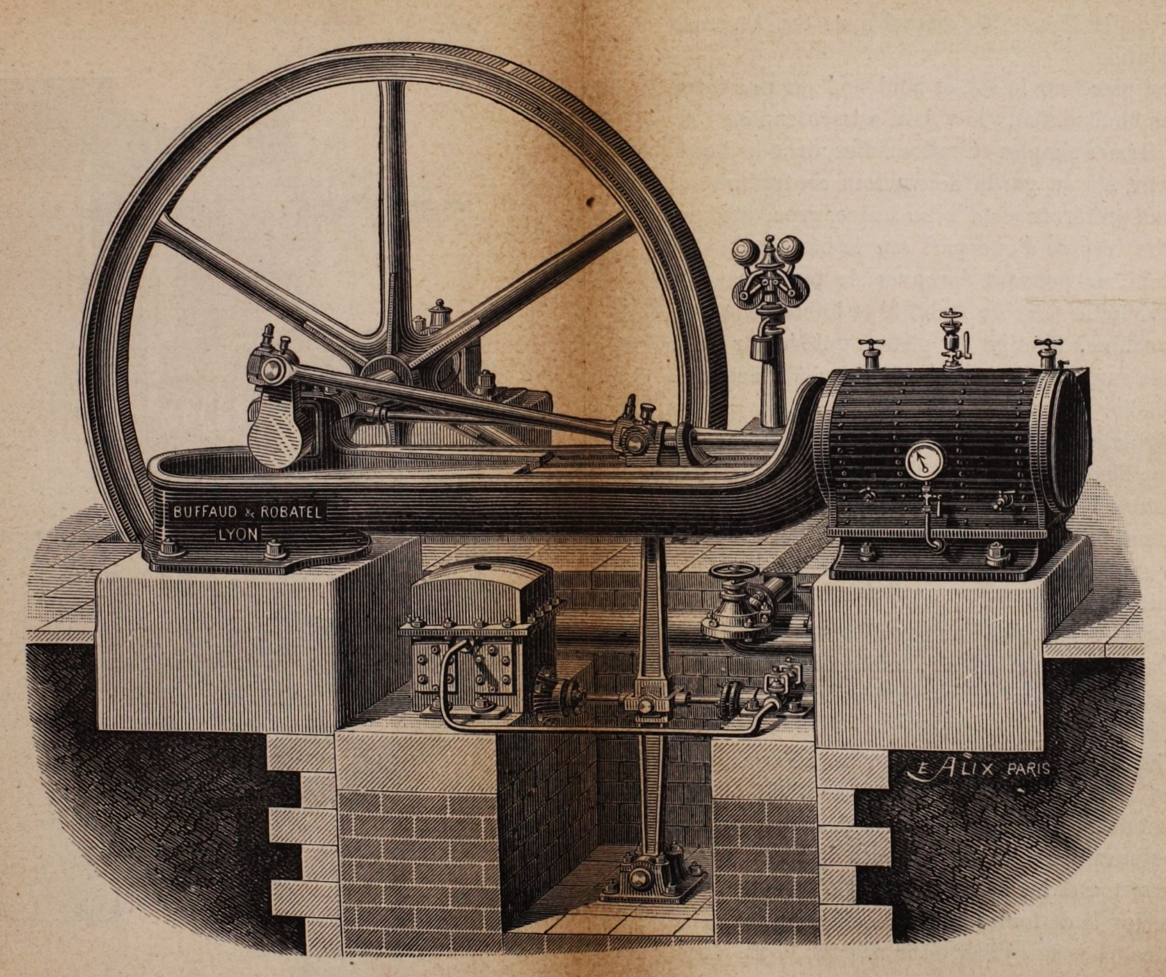


FIG. 38. — Machine horizontale Buffaud et Robatel (voy. page 182).

eurent de la vogue en leur temps, mais qui ont complètement disparu depuis lors. Le seul type qui soit resté en faveur est celui de la figure 35, auquel nous consacrerons une brève description.

Le cylindre est placé sur le sol, et boulonné sur une large et épaisse plaque de fondation ; le volant est soutenu en l'air par un bâti, aux formes simples et rationnelles, dans le dessin duquel l'ingénieur n'a eu garde de vouloir contrefaire les architectes : nous préférons cela à un ordre grec, dorique ou ionien. L'arbre repose d'une part sur le bâti, de l'autre sur un mur solide, ne pouvant éprouver de tassement ; la condition est essentielle pour la stabilité et le bon fonctionnement de la machine. La tige du piston, guidée par deux montants attachés sur le cylindre et reliés au bâti, actionne directement la bielle.

L'arbre du régulateur est placé sur le second plan, entre le bâti et le mur ; l'excentrique et sa tige pendent verticalement et font mouvoir le tiroir ; enfin la pompe d'alimentation est mûe elle-même par un excentrique. Ce dispositif ne se prête guère à la condensation, qu'on ne cherche du reste pas à faire pour de petites machines.

Nous nous serions reproché de ne pas décrire ce type, qui ne présente qu'un médiocre intérêt, mais qui a été très répandu et dont on voit encore un certain nombre de modèles dans les petits ateliers.

III. **Machine horizontale.** — Le type horizontal est le plus courant aujourd'hui, mais les ingénieurs ne l'ont adopté qu'après avoir fait de laborieuses écoles avec des types variés, qui n'ont pas toujours justifié les espérances de leurs inventeurs : on a épuisé toutes les solutions avant d'accepter celle qui était la plus simple de toutes. Est-il en effet rien de mieux indiqué que de coucher le cylindre sur un bâti, coulé d'une pièce, sur lequel toutes les pièces peuvent s'aligner parfaitement et se fixer solidement, sans qu'on ait à craindre aucune trépidation, ni aucune déviation des axes. L'ovali-

sation des cylindres était le seul accident à redouter, mais l'expérience a montré que l'on avait singulièrement exagéré la valeur de cette objection : la machine horizontale avait en outre l'inconvénient d'occuper plus de place sur le sol que les machines verticales, mais il est bien rare que l'espace soit mesuré aussi parcimonieusement pour que l'on soit limité au point de ne pouvoir installer une machine horizontale. De fait, ce genre de machines s'est répandu très rapidement, dès qu'il eut été préconisé par des ingénieurs renommés, et, pendant vingt ans, on n'en construisit plus guère d'autres.

La figure 36 (p. 176) montre le type adopté par la maison Farcot et si heureusement perfectionné par elle. La machine portait entièrement sur un socle en fonte formant bâti, sur lequel on boulonnait le cylindre, les coulisseaux et les paliers. La détente était opérée par la distribution à entraînement par laquelle le nom des Farcot a acquis une si large notoriété : la durée de l'admission était commandée par le régulateur, à l'aide d'une tringle pendante, qui faisait osciller sans effort la came jouant le rôle de butoir. Ce modèle était excellent et il faisait un excellent service, quand le moteur était bien proportionné au travail qu'on lui demandait. Au point de vue économique, on obtenait des rendements inespérés : l'uniformité du mouvement était du reste remarquable.

Ce type simple de machines est presque abandonné aujourd'hui : le bâti à baïonnette a remplacé l'ancien bâti en U, les détentes se sont compliquées, les machines sont devenues plus délicates et plus coûteuses, sans qu'on réalise toujours une économie de vapeur suffisante pour justifier l'abandon des anciennes formes. Toutefois, quelques mécaniciens bien avisés construisent encore de ces machines, qui trouvent fort bien leur emploi dans des cas déterminés : la machine Davey Paxman, de Colchester (fig. 37, p. 177), offre un dispositif très rationnel et un ensemble fort recommandable pour la commande des petits ateliers et pour le service des industries dans lesquelles on cherche moins à économiser quelques

grammes de charbon qu'à avoir une machine robuste, peu coûteuse de premier établissement et facile à surveiller et à conduire. Telle est encore la machine Buffaud et Robatel de la figure 38 ; le bâti affecte une forme rationnelle et en même temps élégante et tous les organes en sont bien dessinés. La détente est du genre Thomas ; un coin commandé par le régulateur agit sur les plaques de détente entraînées par le tiroir dans son mouvement et permet une introduction aux 4/10. Un régulateur Buss, faisant trois tours par révolution de la machine, donne à cette détente une grande sensibilité. Les espaces nuisibles sont réduits au minimum, grâce à la position des orifices d'introduction qui sont placés contre les fonds ; ils sont du reste placés assez bas pour permettre la purge constante du cylindre. Cette machine possède des qualités sérieuses qui la recommandent à l'attention des industriels.

IV. **Machine Hornsby**. — C'est une machine Compound, dont les cylindres peuvent être placés en tandem ou accouplés : on leur donne une course relativement longue et l'on réduit le nombre des révolutions proportionnellement, tout en conservant une très grande vitesse au piston.

La figure 39 permet de juger de la disposition d'ensemble de cette machine. Le petit cylindre est pourvu d'un double tiroir avec détente automatique par le régulateur. Les constructeurs ont cherché par dessus tout la stabilité et tous les organes sont dessinés dans ce but ; on y remarque surtout les larges surfaces des parties frottantes et les précautions prises pour faciliter et assurer le graissage.

V. **Machine Chaligny**. — MM. Chaligny et Guyot-Sionnest, successeurs de M. Calla, ont la spécialité d'une machine Compound entièrement compacte, montée sur un bâti unique disposé pour éviter les soubassements en maçonnerie : ce type est figuré à la page suivante.

L'objectif de ces constructeurs a été de rester dans les dispositifs simples. Les distributions sont opérées par des tiroirs

à coquille ; l'admission est variable à la main dans le petit

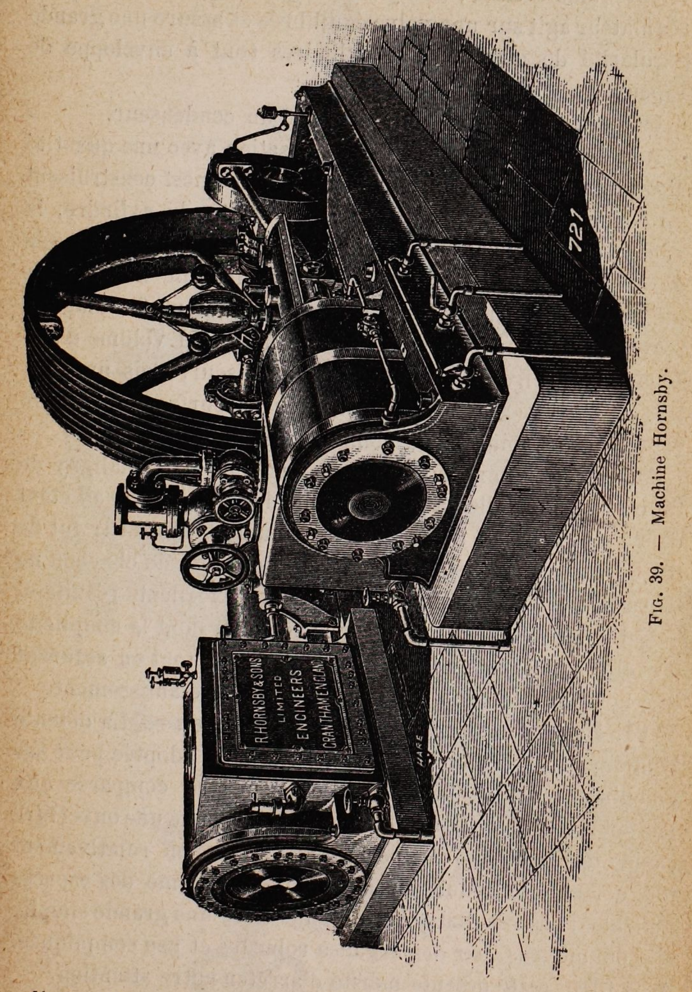


Fig. 39. — Machine Hornsby.

cylindre. La vapeur, après avoir travaillé dans ce cylindre, passe dans un réservoir intermédiaire et pénètre de là dans

le grand cylindre pour y compléter sa détente. L'arbre est à vilebrequins croisés ; il n'y a donc pas de points morts. Un régulateur agit sur une valve équilibrée et assure une grande régularité de marche. Les cylindres sont à enveloppe de vapeur.

On peut adjoindre à cette machine un condenseur.

Afin de pouvoir faire de la condensation avec une quantité d'eau minime, MM. Chaligny et Guyot-Sionnest construisent un condenseur à eau régénérée. Au sortir du cylindre, la vapeur est reçue dans un condenseur à injection ; l'eau chaude de condensation est envoyée par la pompe elle-même, dans un réfrigérant, dans lequel l'eau tombe sur un fascinage, à travers lequel un ventilateur chasse un grand volume d'air. L'eau ainsi refroidie retourne au condenseur, mais une partie est envoyée dans un condenseur à surface et elle est reprise en ce point par la pompe d'alimentation.

M. Hirsch a expérimenté sur une machine Chaligny de 30 chevaux installée à la compagnie de l'Est ; le travail étant de 24 chevaux au frein, la consommation de vapeur fut de $8^{kg},23$ par cheval-heure effectif et la dépense de charbon ne dépassa pas 1083 grammes, ce qui sont d'excellents résultats.

Cette machine est un bon type courant, dont la simplicité n'exclut pas l'économie de fonctionnement, tout en assurant une notable réduction des frais de premier établissement.

VI. **Machine Bonjour (Compagnie de l'Horme).** — La détente Bonjour, que la Compagnie de l'Horme a adoptée pour ses machines les plus perfectionnées, peut être comparée aux meilleures distributions à déclic, car elle donne une ouverture rapide des lumières, elle permet une admission relativement longue, et elle réduit au minimum le volume des espaces nuisibles ; ces résultats sont obtenus avec une grande simplicité de moyens, par des organes robustes et peu compliqués. A ce titre, cette détente mérite d'arrêter notre attention.

La figure 41 montre la disposition générale d'une machine Bonjour à un seul cylindre ; on voit que le constructeur a

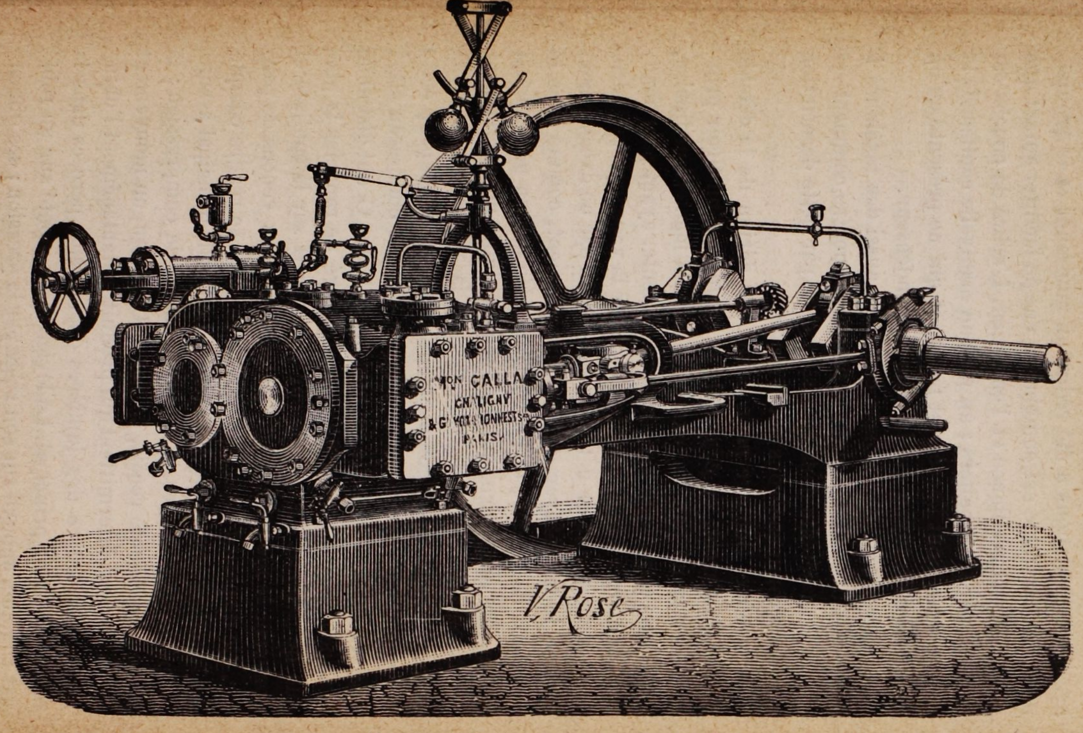


Fig. 40. — Machine Compound Chaligny.

réalisé une forme compacte, occupant peu de place ; le nombre des articulations a été réduit au minimum et le groupement de l'ensemble est combiné en vue de faciliter autant que possible la surveillance et l'entretien. L'arbre de couche est soutenu par trois paliers ; un plateau manivelle commande la pompe à air, dont l'accès est facile, et qui ne présente qu'un joint, celui du tuyau qui la relie au condenseur.

La Compagnie de l'Horme construit aussi des machines à deux cylindres Compound ; la figure 42 montre comment est disposée sa détente dans ce cas, et c'est par cette description que nous commencerons notre étude.

La détente Bonjour pour Compound dérive de la détente Meyer ou Farcot, en ce qu'elle se compose d'un tiroir principal, actionné par un excentrique à la manière ordinaire, sur lequel s'applique une plaque de détente, ayant pour fonction de couper à temps voulu l'accès de la vapeur au cylindre. Mais cette plaque de détente n'est mûe ni par un excentrique, comme le fait Meyer, ni par entraînement, comme dans le dispositif de Farcot ; elle est commandée par un petit piston à vapeur auxiliaire, qui lui communique un mouvement extrêmement rapide de rappel. Sur la figure 42, A est la barre d'excentrique commandant le tiroir principal ; cette barre porte une coulisse de détente, dont le coulisseau attaque la bielle B, à laquelle est attaché le levier C, qui distribue la vapeur sur les faces du piston chargé de rappeler la plaque de détente. Le régulateur agit par D sur la coulisse et gouverne le mouvement du piston dont nous venons de parler. Ce dispositif étant connu, il est aisé de se rendre compte du fonctionnement de la détente. Le tiroir principal assure les périodes d'avance, d'échappement et de compression ; la plaque de détente reçoit, de son petit piston, un mouvement de va et vient intermittent qui produit instantanément l'obturation alternative des lumières d'admission percées dans la masse du tiroir principal. Le levier C est monté sur un robinet conique, appuyé sur son siège par la pression ; ses dimen-

sions sont très petites comme celles du piston qu'il fait mouvoir en avant et en arrière. Le robinet s'ouvre au moment même où la plaque de détente doit être rappelée, soit dans un sens soit dans l'autre. Mais il faut amortir le choc produit par cette rapide impulsion de la plaque ; pour cela, la tringle se prolonge à travers la boîte à vapeur, et elle aboutit à un *dashpot* à huile disposé symétriquement à l'arrière de cette boîte : on peut, grâce à ce petit appareil, atteindre une vitesse des plus considérables, sans bruit ni trépidation, et c'est un grand point, car on cherche aujourd'hui à activer l'allure des machines motrices.

Les figures 43 et 44 nous montrent un autre genre de détente appliquée aux machines à cylindre unique : ce dispositif est tout différent du premier : A est la bielle qui commande le tiroir principal ; B attaque le tiroir de détente ; les deux mouvements sont pris sur le même collier d'excentrique. Ainsi donc le tiroir principal et la plaque de détente sont mûs par un seul excentrique.

Les variations de la détente sont obtenues par un changement d'orientation du collier de l'excentrique, obtenu par les leviers C et D, rattachés au régulateur par la tringle E. Pour passer de l'admission nulle à l'admission maximum, l'oscillation du levier C, dit *levier d'orientation*, n'est que de 30 degrés, et lorsque le régulateur est à sa position supérieure, les orifices du tiroir principal restent continuellement ouverts ; il n'y a donc plus d'admission du tout. La position sur le levier d'excentrique du point qui actionne le tiroir principal est telle, que le mouvement de ce tiroir n'est pas influencé par le déplacement relatif du collier ; ses périodes d'avance, d'admission et de compression restent constantes, dans toutes les positions du levier d'orientation, et la course de la plaque de détente varie seule.

Cette détente donne assurément une fermeture moins prompte que la première, mais elle fournit encore des dia-

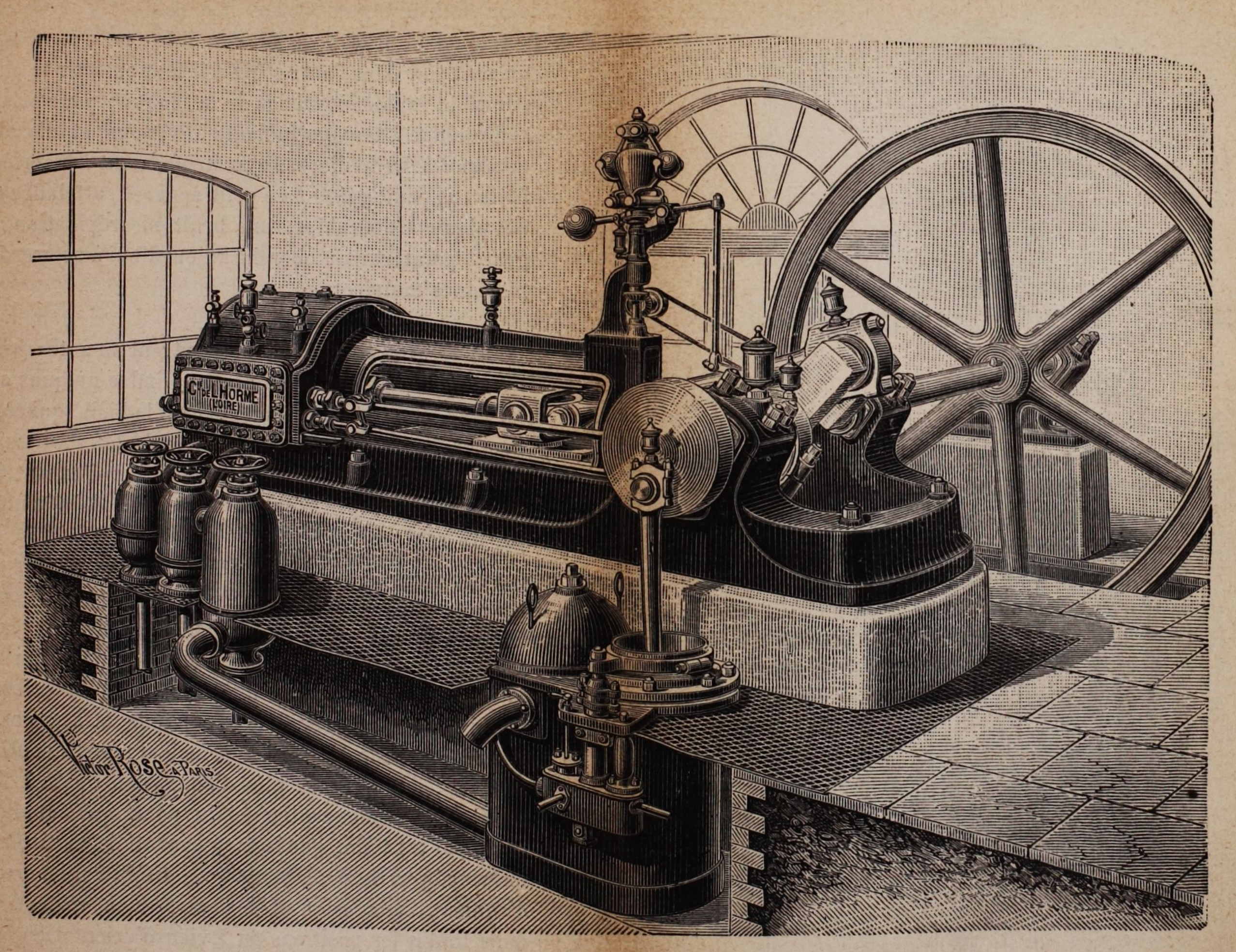


FIG. 41. — Machine Bonjour (Cie de l'Horme, Loire) (voy. p. 184).

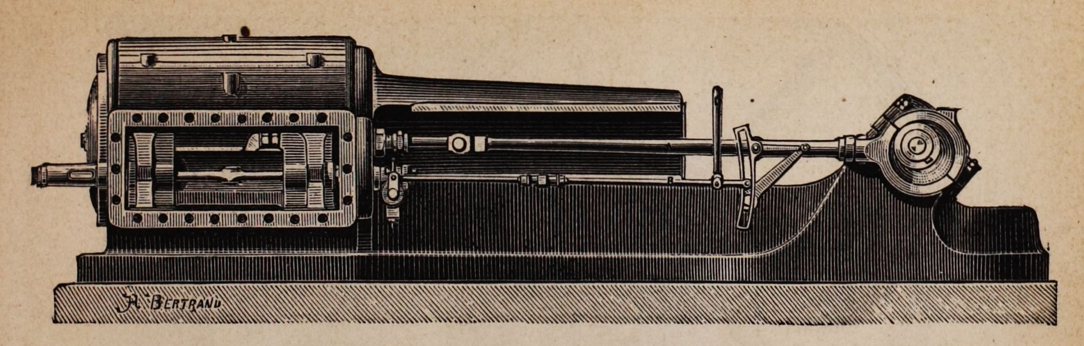


Fig. 42. — Détente Bonjour pour Compound.

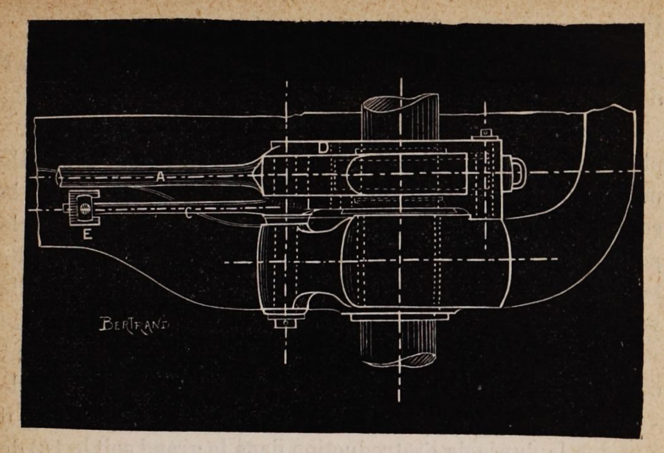


Fig. 43. — Détente cinématique Bonjour.

Fig. 44. — Élévation de la détente Bonjour.

grammes à coupures très nettes et assez semblables à ceux des meilleures machines à déclic.

Revenons maintenant à la détente à rappel instantané, employée pour les machines à deux cylindres Compound. Elle permet de faire varier l'admission de 0 à 7 dixièmes de la course du piston moteur ; mais elle ne s'applique que sur le petit cylindre. Le grand cylindre devant débiter intégralement le volume de vapeur détendu dans le petit, et le volume de ce petit cylindre étant constant, il en résulte que le volume introduit dans le grand cylindre doit être également constant, quel que soit le travail de la machine. De plus, le volume des deux cylindres étant dans le rapport de 1 à 3, il faut que la durée de l'introduction dans le grand soit le 1/3 de la course du piston. On la fait un peu plus forte, pour être certain que la vapeur dépensée par le petit cylindre soit complètement absorbée par le grand. La distribution au grand cylindre se fait à l'aide d'un seul tiroir commandé par un seul excentrique.

Le but cherché par l'inventeur est obtenu ; le nombre des organes est aussi restreint que possible.

La vitesse des machines Bonjour est grande ; une machine de 45 chevaux Compound fait 150 tours à la minute, et une machine de 250 chevaux fait encore 100 révolutions. Les machines monocylindriques ont des vitesses de 150 à 80 tours.

Certaine par expérience des résultats fournis par ce genre de machines, la Compagnie de l'Horme garantit par contrat une consommation de 6,5 à 7,6 kilogrammes de vapeur par cheval-heure pour les Compound et de 7 à 8,5 kilogrammes pour les machines à un seul cylindre. Ce fait devait être signalé. Il témoigne de la marche excellente de ces machines. La régularité du fonctionnement est remarquable, nous dit-on ; elle est assurée par un régulateur étudié avec soin et disposé de telle sorte que le moment de la masse centrale augmente proportionnellement à l'accroissement du cosinus de

l'angle d'écartement des masses régulatrices; on évite ainsi une cause de perturbation sensible.

VII. **Machine Windsor à balancier.** — Il appartenait à une ancienne maison, fondée en 1832, à Rouen, de conserver le type primitif de Woolf à balancier, qui avait rendu tant de services à l'industrie textile de la Normandie. M. Windsor s'est donné la tâche de rajeunir ce genre de machines en le mettant au niveau des progrès les plus récents, et il a réussi à faire un moteur qui peut rivaliser, comme économie et rendement, avec les types les plus étudiés et les plus modernes, et qui a, de plus, la prétention de leur être supérieur comme stabilité et comme durée. Cette machine Woolf, à balancier, a fait bonne figure à l'Exposition où elle était, croyons-nous, unique de son espèce: ce sera une raison de la décrire avec plus de soin.

Rappelons d'abord ce que nous avons dit des machines à balancier; c'est à tort que l'on a prétendu que le mouvement alternatif du balancier et des lourdes bielles qui y sont attachées absorbent de la puissance vive en pure perte; car la vitesse de ces pièces diminue progressivement, sans secousses, depuis le maximum jusqu'à zéro, cette vitesse nulle correspondant aux points morts; leur inertie contribue, au contraire, à régulariser leur mouvement et, à cet égard, ces machines n'ont point de rivales.

M. Windsor a supprimé le papillon qui étranglait la vapeur dans les anciennes machines, et il a appliqué une détente variable par le régulateur; de plus, il a adopté un nouveau tiroir de distribution pour le grand cylindre; c'est un tiroir *de compression* dont l'office est d'activer sensiblement la vitesse de rotation. Nous allons montrer par quelle disposition ingénieuse son fonctionnement est mis sous la dépendance du régulateur.

Un régulateur très sensible agit sur un organe intermédiaire dont l'action est prompte, énergique et parfaitement libre, de manière à ce qu'il ne dépasse pas dans son mouve-

ment la position d'équilibre qu'il convient de lui donner. Le régulateur est du système Porter; agissant par un système de levier sur une came à bosses, il détermine les variations de l'admission par le tiroir de compression. La vapeur arrive d'abord des chaudières dans l'enveloppe du cylindre et elle passe de là dans la boîte de distribution du petit cylindre, au moyen d'une valve de mise en train. Le tiroir est à grille; l'admission est constante, mais les deux cylindres sont montés en Compound et la détente varie au grand cylindre, suivant les besoins du travail. Cette variation dépend de la position de la came à bosses, qui soulève le tiroir de détente par des tiges verticales: il nous suffit de montrer comment le régulateur commande la came en la faisant glisser sur son arbre carré disposé horizontalement.

C'est un piston qui est chargé de cette opération; ce piston se meut dans un cylindre vertical, et il est rattaché par le bas à la came par l'intermédiaire d'un levier coudé en équerre. La partie inférieure du piston reçoit la pression de l'atmosphère; sa partie supérieure est reliée à la bâche du condenseur et, en vertu du vide relatif qui y règne, il subit de ce côté une pression moindre: il tend par suite à se soulever. Toutefois, la tige du piston est creuse; elle porte dans sa partie inférieure quatre orifices égaux et symétriquement placés en regard d'un tiroir circulaire maintenu par un étui en bronze. Quand ce tiroir est fermé, le vide est plus complet sur le piston et l'appareil est soulevé; quand, au contraire, ce tiroir s'ouvre, l'air pénètre dans la partie supérieure du cylindre et le piston retombe; il en résulte chaque fois une position déterminée de la came à bosses. Or, c'est le régulateur qui fait tourner le tiroir circulaire autour de son axe; en effet, sa tringle se soulève et s'abaisse, et ce mouvement vertical se transforme en une rotation par l'action des rainures hélicoïdales d'un écrou auquel la tige creuse du piston est suspendue.

Ces mouvements du piston et de la came à bosses sont

extrêmement doux, parce que toute garniture a été supprimée; la résistance est réduite à des frottements insignifiants.

Il est à remarquer que toute modification de position produite par les déformations du pendule se fait sans vitesse: c'est un élément très recherché de la stabilité de l'appareil de régulation.

Le balancier de la machine Windsor est soutenu par un grand beffroi à quatre colonnes supprimant l'ancien entablement architectural des machines; la solidité et la rigidité des pièces ne sont cependant pas moindres, et l'on évite toute attache au mur, ce qui est un avantage réel. D'autres perfectionnements ont encore été introduits dans les machines Windsor; des paliers graisseurs automatiques portent l'arbre du volant; la bielle mobile porte des chapes avec cuivres mobiles inférieurs permettant le débrayage de cette bielle sans démonter le manneton. La machine est parfaitement équilibrée et tous ses organes sont en acier.

Le volant de ces machines est en deux pièces; il a $5^{m},50$ de diamètre et sa jante est disposée pour recevoir une courroie de 65 centimètres de largeur.

Pour une puissance de 120 chevaux, le petit cylindre mesure $0^{m},390$ et le grand cylindre $0^{m},740$ de diamètre; les courses respectives sont de $1^{m},24$ et $1^{m},68$; la vitesse de régime ne dépasse pas 36 tours par minute.

La maison Windsor construit aussi des machines horizontales en tandem, à détente variable par le régulateur, qui méritent l'attention; mais nous avons cru devoir insister particulièrement sur la belle machine à balancier que nous venons de décrire, parce que, dans ce domaine, l'habile constructeur de Rouen a peu de rivaux.

VIII. **Machine Satre.** — M. Henri Satre, de Lyon, a préféré, aux appareils à déclic et à distribution compliquée, le tiroir simple et classique, dont l'entretien et le réglage sont à la portée de tous les mécaniciens, et il a créé un type *Woolf et*

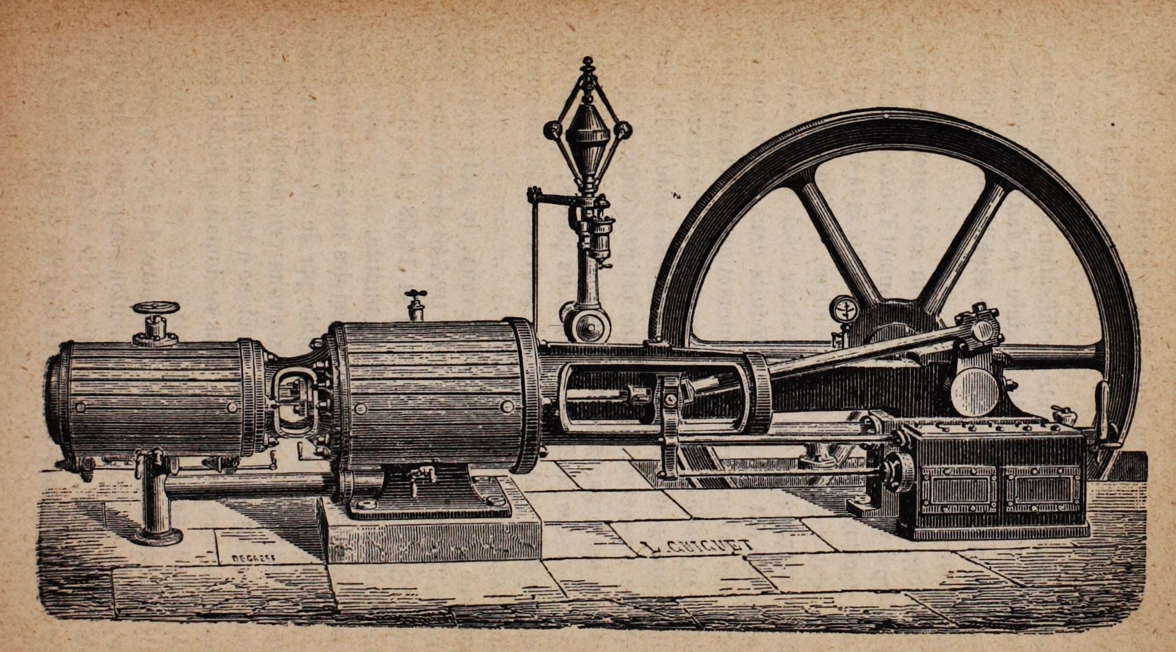


FIG. 45. — Machine Satre à simple manivelle (voy. p. 198).

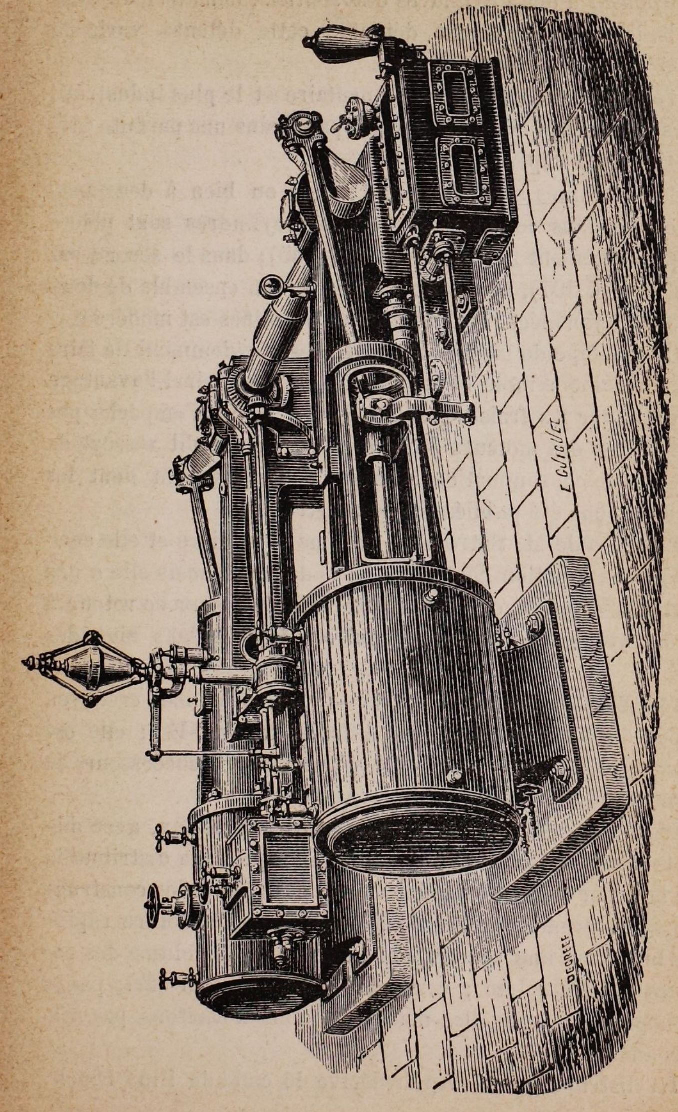


Fig. 46. — Machine Satre à double manivelle.

Compound à deux cylindres différentiels, dans chacun desquels il se produit une détente ; cette détente varie de 0 à 6/10 dans le petit cylindre.

C'est le moteur le plus élémentaire et le plus industriel, mais cette simplicité n'en permet pas moins une parfaite utilisation de la vapeur.

Ces machines se construisent à une ou bien à deux manivelles; dans le premier cas, les cylindres sont placés en prolongement l'un de l'autre (fig. 45); dans le second cas (fig. 46, p. 197), la machine constitue un ensemble de deux machines jumelées. L'allure de ces machines est modérée.

Le principe de la machine Satre est évidemment de faire une machine simple et robuste; on obtient ainsi l'avantage de diminuer les frais d'établissement, ce qui n'empêche pas de réaliser des moteurs économiques, ainsi qu'il ressort de relevés de consommation faits en travail courant dont les résultats ont été publiés par le constructeur.

La thèse de M. Satre nous ramène en arrière et elle constitue une réaction contre les idées du jour; mais elle a des partisans et nous nous garderons bien de blâmer ce retour à la détente par tiroir simple qui est justifié dans bien des cas.

IX. **Machine Duvergier-Piguet**. — Cette machine, créée en 1864, est fort répandue dans l'Est et le Sud-Est : elle est construite avec succès par MM. Piguet et C[ie], successeurs de Duvergier, à Lyon.

C'est une machine horizontale à haute pression, avec détente variable par le régulateur, dans laquelle la distribution est faite par tiroirs, ce qui n'exclut pas, disent les constructeurs, de grands orifices de passage, une fermeture rapide des lumières, une remarquable réduction de volume des espaces nuisibles, etc.; ces qualités ne sont, en effet, pas le monopole des nouvelles machines, nous n'hésitons pas à le reconnaître.

La distribution Duvergier dérive de celle de Pius Finck,

que nous avons décrite en son lieu. Un tiroir, analogue à celui de Meyer, reçoit son mouvement d'un excentrique ordinaire; la plaque de détente est commandée par une coulisse, dans laquelle un coulisseau peut être relevé ou abaissé par l'action du régulateur. Il nous suffit de dire comment cette coulisse est mûe par l'excentrique unique de la machine.

Cet axe, placé en un point inférieur du collier d'excentrique, attaque un levier de renvoi de mouvement dont le centre est sur l'arbre même; ce levier est relié par une bielle à une extrémité de la coulisse. Or, cette coulisse est suspendue par son centre, de sorte que la bielle lui donne un mouvement d'oscillation que partage le coulisseau. Ainsi que nous l'avons expliqué ci-dessus, le coulisseau est relié par le régulateur, agissant sur un long bras de levier, de manière à réduire l'effort au minimum.

La machine Duvergier a été l'objet d'essais très sérieux faits par les ingénieurs les plus compétents et les plus distingués de la région lyonnaise; ils ont toujours obtenu les meilleurs résultats. Signalons entre autres un essai fait à Lyon, chez MM. Vachon père et fils, sur deux machines accouplées de 60 centimètres de diamètre et 1^{m},20 de course. Le travail indiqué égala 200 chevaux, alors que le travail effectif fut trouvé de 182 chevaux; c'est un rendement organique de 0,91, assurément très remarquable. Le charbon était de qualité médiocre, et il renfermait 15 pour 100 de cendres; on en brûla 879 grammes par cheval-heure effectif. La consommation de vapeur correspondante était de 7 kilogrammes. L'essai avait duré dix heures. Ce beau rendement a été obtenu maintes fois par la machine Duvergier; aussi ne faut-il pas s'étonner de voir MM. Piguet garantir par contrat une consommation de 900 à 1000 grammes de charbon, suivant la puissance des moteurs. Cet exemple démontre que les machines à déclic et à tiroirs multiples peuvent être égalées par les machines des types anciens, au point de vue de la con-

sommation, quand elles sont bien construites et bien étudiées. Nous donnons ci-dessous deux diagrammes relevés par

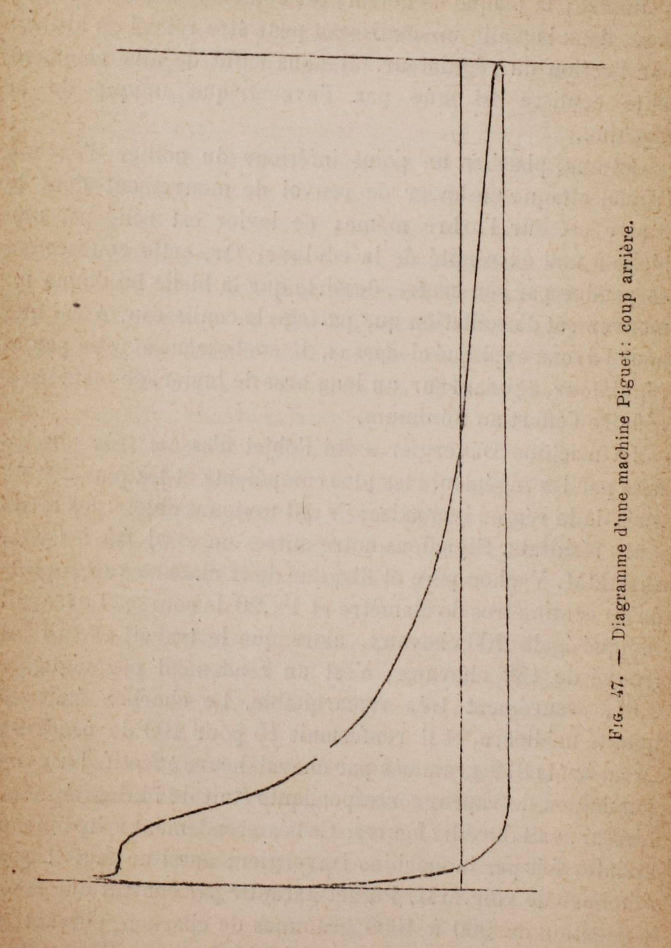


Fig. 47. — Diagramme d'une machine Piguet : coup arrière.

M. Bour, directeur de l'Association lyonnaise des propriétaires d'appareils à vapeur, sur une machine de 80 chevaux, placée par MM. Piguet à la manutention militaire de Lyon.

Le rendement organique de cette machine fut trouvé égal à 0,917.

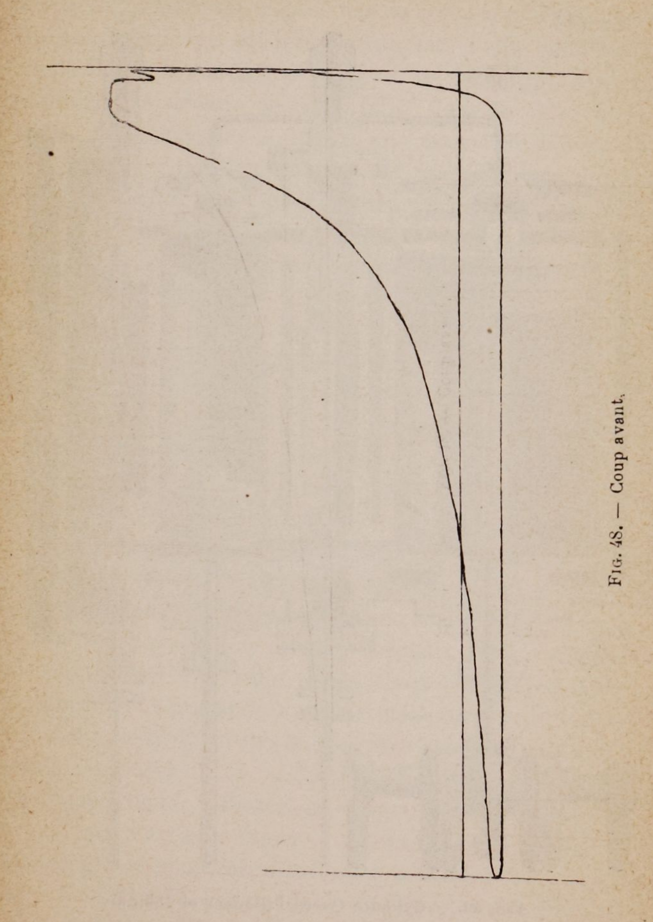


Fig. 48. — Coup avant.

X. **Machine Queruel (Douane et Jobin)**. — Cette machine est du type Woolf, à deux cylindres accolés, avec manivelles calées à 180°; elle constitue un type original, dans lequel la

disposition des cylindres et les agencements de la distribution présentent un réel intérêt.

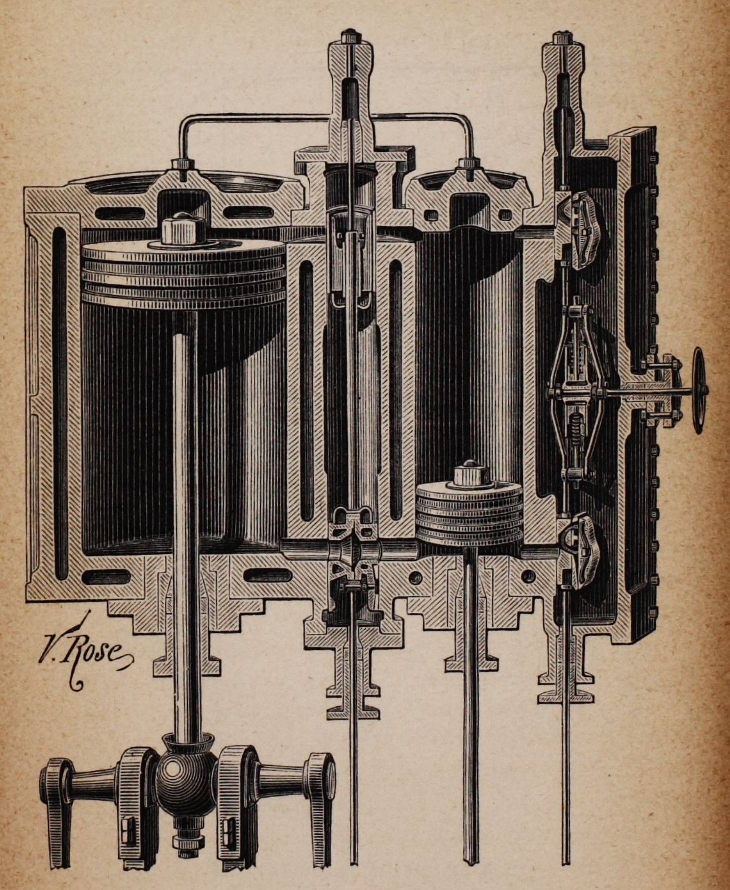


Fig. 49. — Cylindre Quéruel (Douane et Jobin).

Ces cylindres (fig. 49) sont de même longueur; ils sont séparés l'un de l'autre par une capacité dans laquelle se meut le tiroir de transvasement ou tiroir intermédiaire, auquel est

dévolue la fonction d'alimenter le grand cylindre par la vapeur de décharge du petit; le tiroir principal d'alimentation de ce petit cylindre est disposé sur le côté, vers l'extérieur.

Ce tiroir principal est très simple, car il n'a qu'à opérer l'admission de la vapeur, et non pas sa décharge; dans ces conditions, la détente peut se faire dans les plus larges limites; en surmontant le tiroir d'une plaque de détente à la façon de Meyer, M. Quéruel arrive à terminer brusquement l'admission et à produire des diagrammes comparables à ceux des meilleures machines à déclic. Mais le tiroir intermédiaire est l'organe le plus original de cette machine : il est disposé de telle sorte, qu'avec une force modérée, absorbée par son fonctionnement, il donne néanmoins une ouverture énorme de passage à la vapeur à transvaser d'un cylindre dans l'autre. Les orifices des deux cylindres sont l'un en face de l'autre ; ils sont du reste fort considérables et aboutissent à deux glaces parallèles. C'est entre ces glaces que glisse le tiroir intermédiaire portant en face de chaque orifice une ouverture de même section. Ces ouvertures sont reliées l'une à l'autre par un petit canal traversant de part en part le tiroir intermédiaire : ce dernier est divisé en deux parties distinctes, s'appuyant chacune sur la glace du cylindre sur laquelle elle doit opérer. Ces deux moitiés marchent du reste comme une seule pièce, étant renfermées dans le même cadre et commandées par le même organe. Pour obtenir l'étanchéité du tiroir, le joint de séparation de ses deux moitiés est constitué au milieu du canal par une sorte de soufflet métallique, à l'intérieur duquel s'exerce, pour l'ouvrir, la pression de la vapeur. La vapeur appuie donc sur les deux glaces opposées et les fuites sont réduites au minimum. L'organe de commande de ce tiroir intermédiaire est un excentrique calé à 90° des manivelles et faisant mouvoir en même temps le tiroir qui livre issue à la vapeur vers le condenseur.

MM. Douane, Jobin et Cie, successeurs de A. Crespin, qui

sont les concessionnaires du brevet Queruel, construisent des machines verticales et horizontales de ce type; les avantages restent les mêmes. Leur modèle de machine à pilon (fig. 50)

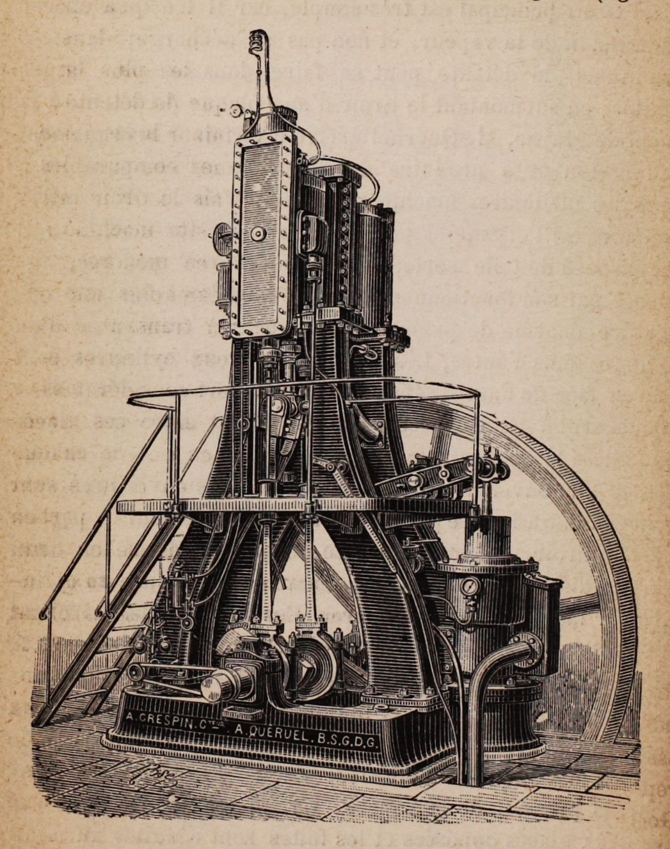


Fig. 50. — Machine à pilon Queruel.

est particulièrement bien étudié : ses deux pistons s'équilibrent et assurent la stabilité de l'ensemble. Une solide plaque de fondation, en fonte, est boulonnée sur le massif de maçon-

nerie, et elle porte quatre piliers tubulaires, creux, arqués à la base, rectilignes à leur partie supérieure, fortement reliés entre eux au sommet, sur lesquels sont boulonnés les cylindres. La pompe à air est venue de fonte avec un pilier ; elle est activée par la tige du gros piston au moyen d'un balancier.

Cette machine est d'un entretien facile et sa consommation de vapeur est très réduite.

XI. **Machine Davey, Paxman & Cie.** — MM. Davey, Paxman et Cie, de Colchester (Angleterre), construisent un type spécial de machines, qui a eu un grand succès auprès des électriciens. Parmi les nombreux modèles de cette maison, nous signalerons spécialement la machine Compound, qui actionnait la station Gramme à l'Exposition de 1889; c'est une machine à bâti à baïonnette, de 360 chevaux, dont les bâtis forment palier et glissière cylindrique et portent le cylindre.

Ce qui caractérise particulièrement cette machine, c'est la détente automatique par le régulateur, inventée par M. Paxman et brevetée à son profit; elle se compose de deux tiroirs plans et présente dans son ensemble quelque analogie avec les détentes Gonzenbach et Meyer. Nous la voyons représentée sur la figure 51. Le tiroir plan A, qui est conduit par un excentrique circulaire, détermine l'avance à l'admission, l'avance à l'échappement et la compression; il joue le rôle du tiroir principal de Meyer, et est percé, comme lui, de deux lumières. Un diaphragme, fixé dans la boîte à vapeur et assujetti contre ses bords, coupe cette boîte en deux; on l'a représenté en BC; il rappelle le diaphragme de la détente Gonzenbach. Le tiroir principal appuie, d'une part, sur sa glace et, de l'autre, il glisse sur le diaphragme qui lui distribue la vapeur par deux ouvertures. Un petit tiroir de détente D repose sur l'autre face du diaphragme : il porte, lui aussi, deux orifices. Cette plaque de détente n'a pas de recouvrement; en se déplaçant, elle ouvre tour à tour les deux ouvertures pratiquées dans le diaphragme, et les referme, en

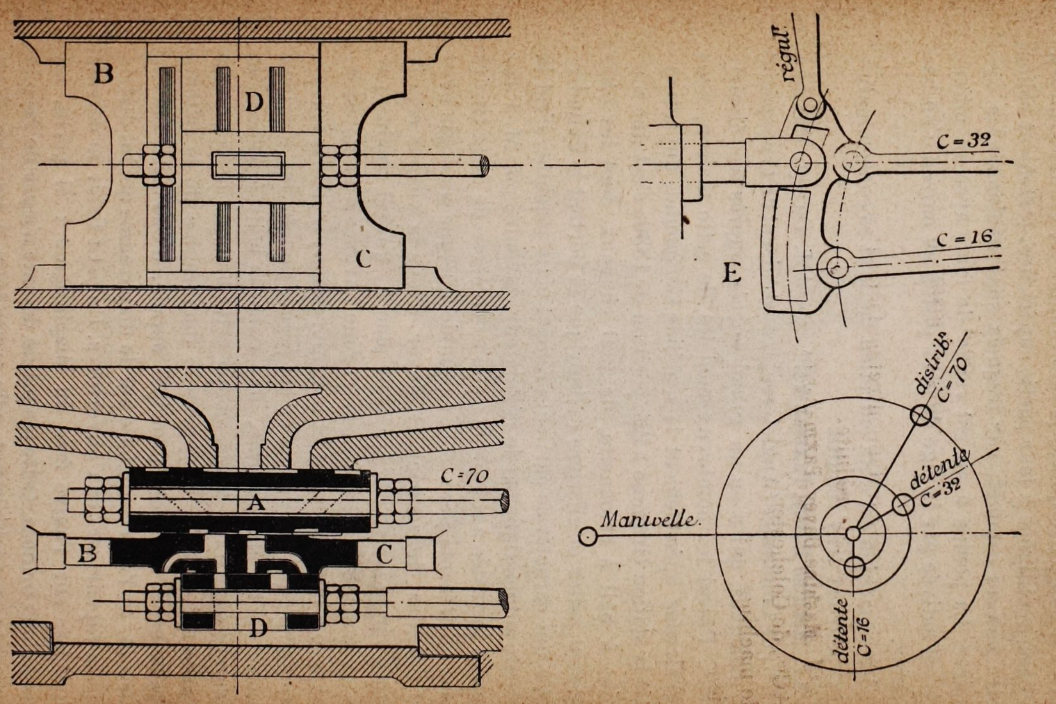


Fig. 51. — Détente Paxman.

produisant ainsi l'admission de la vapeur et sa détente. S'il n'y avait pas d'avance à l'introduction, cet appareil permettrait de faire varier l'admission de 0 à 1; en réalité, elle varie de 0 à 0,8.

La plaque de détente est conduite par une coulisse attachée, à ses deux extrémités, à deux excentriques à course inégale, soit égale à 16 et à 32 millimètres; le premier, appelé excentrique positif, donne une admission prolongée, tandis que l'autre, appelé excentrique négatif, ne donne qu'une admission presque nulle. La coulisse F est suspendue à un levier commandé par le régulateur; quand celui-ci occupe sa position la plus basse, l'excentrique positif admet la vapeur pendant les 5/8 de sa course; à mesure que le régulateur soulève la coulisse, l'action de l'excentrique à faible course devient prépondérante, elle diminue de plus en plus la durée de l'admission. Les ouvertures de la plaque de détente sont doubles, ce qui permet une course réduite et assure une ouverture rapide des lumières. Ce dispositif est ingénieux, car il permet de grandes variations de détente, à avance constante; mais il a l'inconvénient d'exiger trois excentriques, celui du tiroir principal et les deux de la coulisse.

Le régulateur est à masse centrale et à grande vitesse; les bras soulèvent la douille mobile sur l'arbre par l'intermédiaire de rouleaux de friction; ils sont pliés sous un certain angle, et la distance du centre des boules à l'axe du régulateur est constante; les plus petites variations de vitesse sont donc contrôlées par le régulateur. Cet appareil est très puissant et en même temps entièrement sensible.

L'ensemble de cette distribution automatique est très facilement accessible et très robuste; il ne nécessite pas d'entretien et permet de marcher aux plus grandes vitesses.

En octobre 1886, MM. Rick et Kennedy, de Londres, ont procédé à une série d'essais sur une Compound de 100 chevaux placée à South-Kensington; la machine fut prise en

pleine marche, par surprise, pour ainsi dire, sans nettoyage ni revision préalable. Les expériences durèrent moins de six heures, ce qui est un peu court; on obtint les résultats suivants :

Pression à la chaudière	7kg,550	
Travail indiqué au petit cylindre	55,3	chevaux
— — au grand cylindre	55,7	—
TRAVAIL TOTAL	111,0	—
Vapeur consommée par cheval-heure indiqué	10kg,8	
Charbon brûlé	1kg,145	

Vu les conditions particulières de cet essai, les chiffres ci-dessus sont très satisfaisants; en marchant à condensation, on relèverait des condensations beaucoup moindres. Or, toutes les machines Paxman peuvent être munies d'un condenseur. D'autre part, les expérimentateurs ont signalé la marche extrêmement régulière de ce moteur : la vanne de prise de vapeur resta tout le temps ouverte en plein, et le régulateur seul fut chargé de maintenir la constance de la vitesse.

XII. **Machine verticale Compound Buffaud et Robatel.** — Parmi les nombreux types de machines construites par MM. Buffaud et Robatel, de Lyon, nous devons signaler spécialement leur machine verticale Compound, dont nous avons dejà parlé plus haut et qui se voit en élévation et en coupe dans les figures 52 et 53.

Le constructeur a cherché à réaliser dans ces machines une extrême rigidité du bâti pour supprimer toute vibration, malgré la grande vitesse de leur allure; de plus, l'ensemble du bâti est disposé pour éviter les projections d'huile, et sa base a une forme de cuvette, de sorte que tous les liquides découlant des divers organes soient collectés et puissent être recueillis.

[1] Voir page 133.

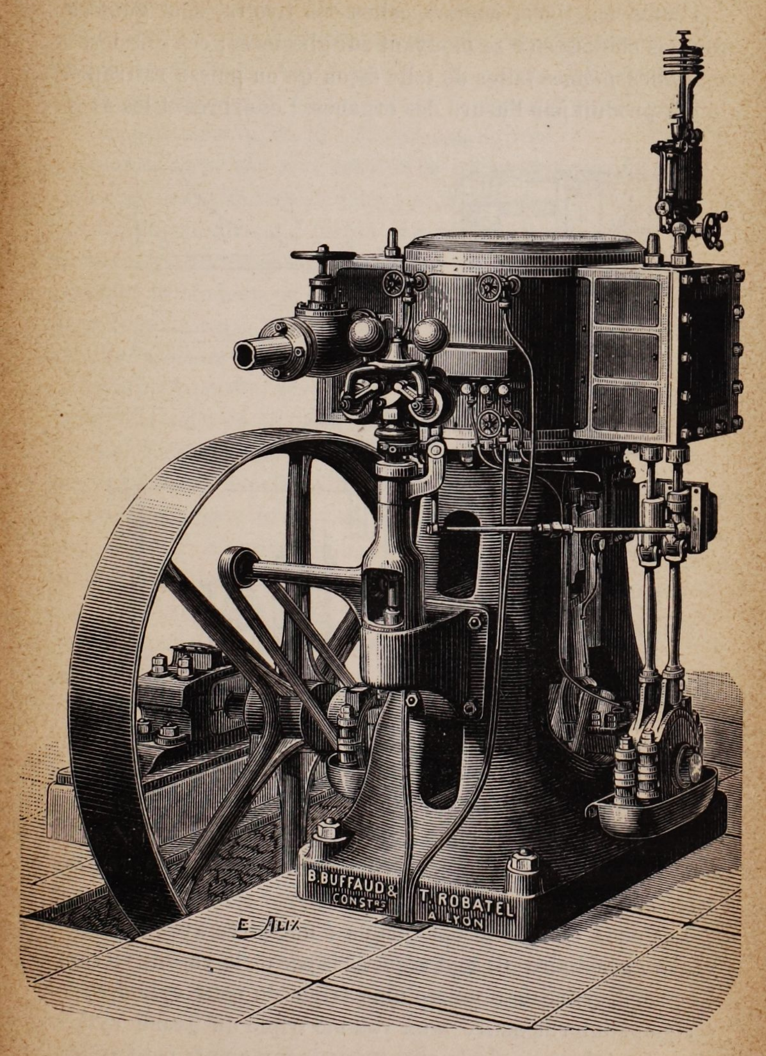


FIG. 52. — Machine verticale Compound Buffaud et Robatel.

Toutes les tiges, comme celles des tiroirs, sont guidées par des coulisseaux se mouvant sur glissières ; ces glissières sont elles-mêmes faites de telle façon qu'on puisse rattraper le jeu produit par l'usure des organes. Les arbres et les axes

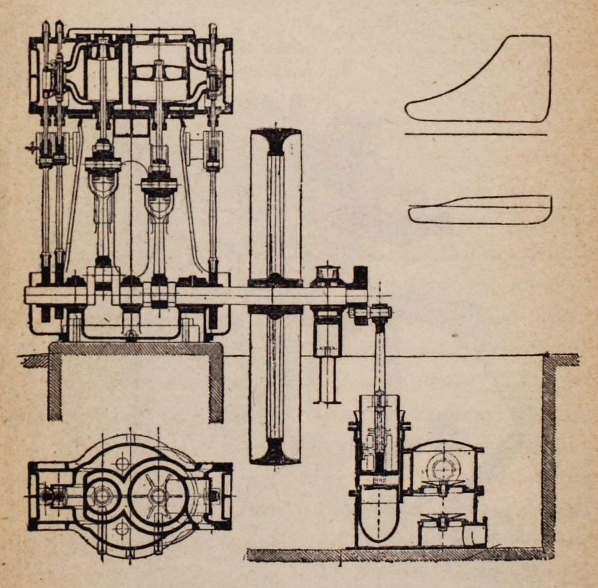


Fig. 53. — Coupe de la machine Buffaud et Robatel.

sont en acier forgé et trempé ; on les parachève après le trempage. Ce peu de mots fait ressortir le soin qu'ont pris les constructeurs pour constituer une machine à grande vitesse.

Les deux cylindres sont fondus d'une pièce avec le *receiver* intermédiaire ; ils sont réchauffés par de la vapeur vierge. Le grand cylindre a un volume triple du petit cylindre ; le récipient intermédiaire a un volume triple du grand cylindre ; il est donc neuf fois plus volumineux que le petit cylindre dont il reçoit momentanément la décharge. Le petit cy-

lindre est à détente variable par le régulateur : la distribution est du genre Rider légèrement modifié, et elle permet une introduction de 0 à 8 dixièmes de la course. Le régulateur isochrone Buss agit par un levier horizontal sur la plaque de détente, ainsi qu'on le voit sur nos figures.

Tout a été prévu pour assurer la purge des eaux condensées dans les cylindres et dans les enveloppes.

La pompe à air est à piston plongeur vertical et se trouve garantie contre les ensablements qui pourraient se produire : on place le condenseur à droite ou à gauche de la machine, mais on peut aussi l'en séparer entièrement et le commander par courroies ou engrenages.

Ce type se prête aussi bien aux puissances de 150 chevaux qu'à celle de 10, et il peut subir des marches de dix heures, à une vitesse de 200 tours, sans aucun échauffement avec une faible dépense d'huile. Des essais ont montré qu'une variation brusque du travail, s'élevant à 80 pour 100 du travail normal, n'amène qu'une variation de 3 pour 100 sur le nombre de tours comptés pendant la minute même pendant laquelle s'est opérée la variation du travail résistant; aussi ces machines conviennent-elles bien aux commandes de machines électriques et elles donnent une fixité de lumière remarquable.

XIII. **Machines Weyher et Richemond.** — La Société centrale de construction de machines de Pantin (anciens ateliers Weyher et Richemond) s'est fait une spécialité des machines à multiple expansion et nous devons signaler :

1° Une machine horizontale Compound;

2° Une machine verticale Compound;

3° Une machine verticale à triple expansion.

La première est formée de deux cylindres entourés d'une enveloppe, restant constamment en communication directe avec la chaudière : la prise de vapeur se fait sur celle-ci en contrebas de la boîte à tiroir placée latéralement. La vapeur est distribuée au petit cylindre par un tiroir à grilles, actionné

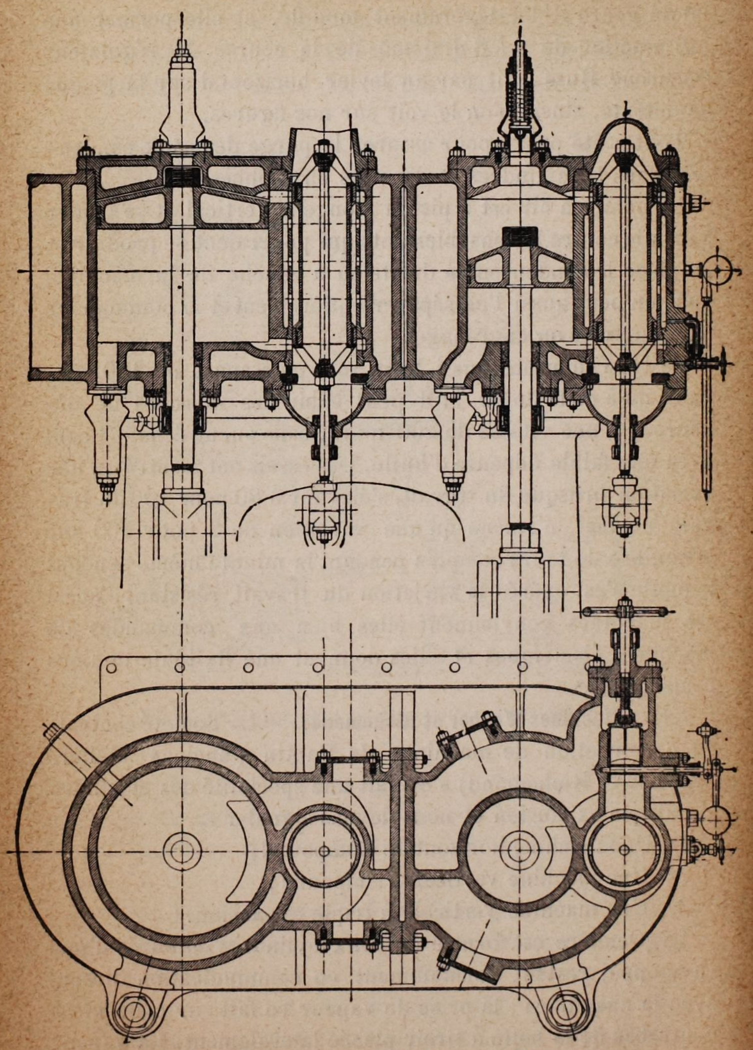


Fig. 54. — Machine Compound Weyher et Richemond.

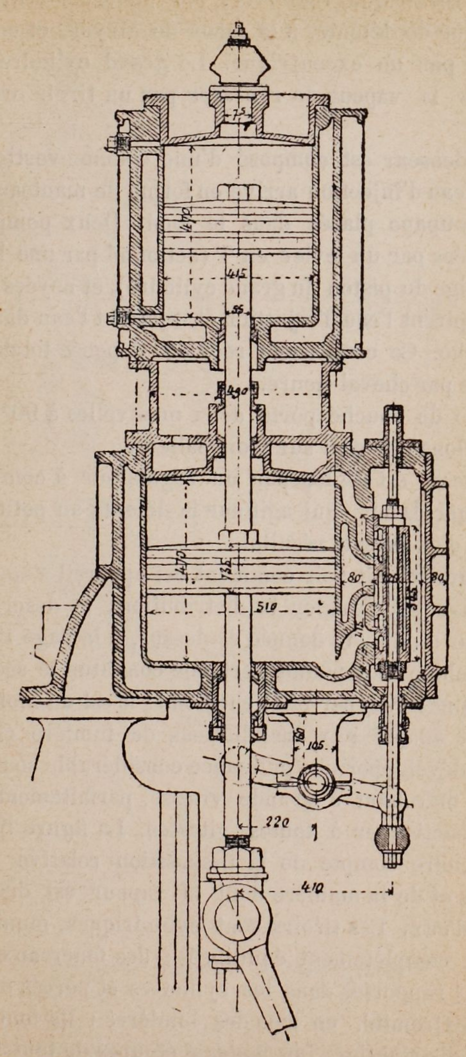


FIG. 55. — Machine Weyher et Richemond, à triple expansion.

par un excentrique, recouvert par un second tiroir, formant plaque de détente, à la façon de Meyer, et commandé lui-même par un excentrique. Le grand cylindre est alimenté par la vapeur du *receiver* par un tiroir ordinaire à coquille.

Le condenseur est composé d'une colonne verticale dans laquelle l'eau d'injection arrive en forme de manteau conique par une soupape placée dans le fond. Deux pompes à air, commandées par un levier en T (actionné par une bielle reliée à la tige du piston du grand cylindre), et noyées dans une bâche, aspirent l'eau d'injection et rejettent l'eau dans le haut de la bâche. Ce condenseur réduit la dépense totale d'eau à 180 litres par cheval-heure.

L'arbre de couche porte deux manivelles à 90° environ ; ses tourillons reposent sur trois paliers.

La vitesse est réglée par un régulateur à compensation automatique Denis, qui agit sur la détente au petit cylindre et donne d'excellents résultats.

La figure 56 fait voir comment cet appareil s'applique sur le cylindre pour régler la distribution ; la description du régulateur a déjà été donnée ci-dessus, à la page 159.

La machine Compound verticale constitue le second type des machines Weyher et Richemond ; c'est un moteur spécialement adapté aux installations de lumière électrique, pouvant développer une puissance considérable sous un petit volume, marchant à grande vitesse, parfaitement réglé et devant fonctionner à toutes vitesses. La figure 54 permet de se rendre compte de la disposition relative des deux cylindres et de la manière dont la vapeur est distribuée à chacun d'eux. Les tiroirs sont cylindriques, munis de segments et complètement équilibrés : des fourreaux de fonte dure sont rapportés dans les cylindres et percés d'orifices à chaque extrémité, en face des lumières : ils font office de table de distribution. Les boîtes à étoupes de toutes les tiges sont remplacées par des boîtes à garniture métallique. Les

manivelles sont calées à 90° : elles sont reliées aux tiges des pistons par de courtes bielles à fourches. Tous les axes et

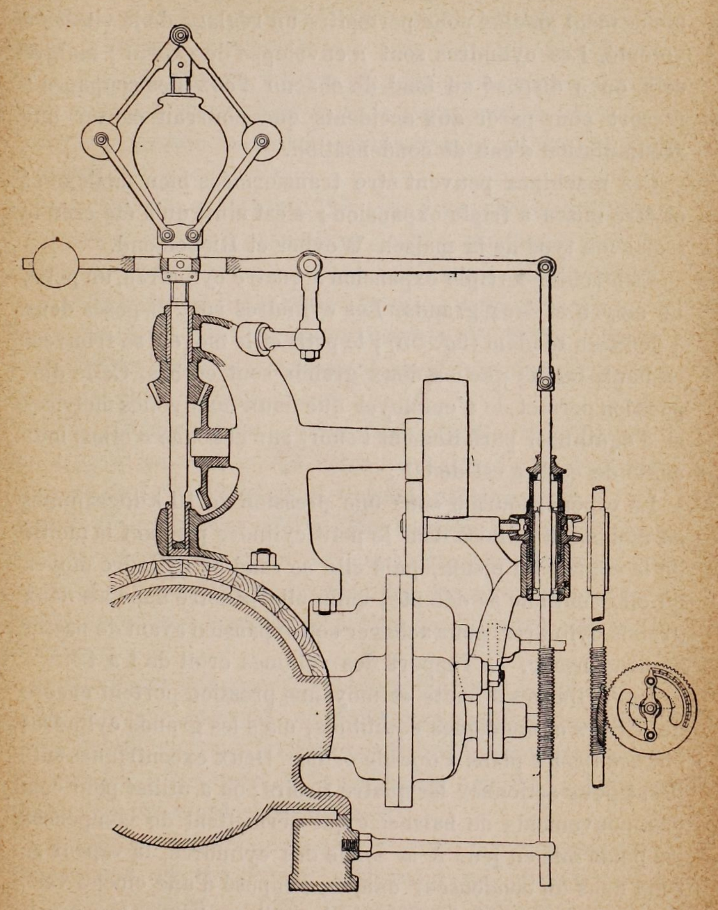


Fig. 56. — Disposition du régulateur Denis.

toutes les tiges sont en acier, les premiers cémentés et trempés, les secondes en acier fondu.

L'arbre moteur porte un volant à chaque extrémité et l'un d'eux renferme un régulateur du genre Armington ingénieusement modifié pour permettre un réglage de la vitesse à volonté. Les cylindres sont à enveloppe de vapeur ; malgré cela, on a disposé au fond de chacun d'eux des soupapes à ressort pour parer aux accidents que pourrait causer une accumulation d'eau de condensation.

Ces machines peuvent être transformées bien facilement et être mises à triple expansion ; c'est ainsi qu'à été créé le troisième type de la maison Weyher et Richemond.

La machine à triple expansion a quatre cylindres, un petit, un moyen et deux grands. Les cylindres sont disposés deux à deux en tandem (fig. 55) ; le petit et le moyen se trouvent en haut, tandis que les deux grands sont en bas. Cette disposition permet de n'employer que deux manivelles motrices et d'équilibrer parfaitement l'effort sur chacune d'elles; leur angle de calage est de 90°.

La vapeur, fournie sous une pression de 10 kilogrammes au moins, est admise dans le petit cylindre pendant la moitié de la course du piston, puis elle se rend au cylindre moyen où elle continue sa détente; enfin elle pénètre dans les deux grands cylindres, pour achever son expansion avant de passer au condenseur. Le rapport des volumes croît de 1 à 12.

Les cylindres à haute et moyenne pression portent encore des tiroirs cylindriques équilibrés, mais les grands cylindres ont des tiroirs plans à double orifice. Deux excentriques suffisent pour actionner les quatre tiroirs ; on a utilisé pour cela des mouvements de balancier qui permettent de compenser les poids mis en jeu. A la sortie des cylindres, la vapeur se rend dans un condenseur unique, composé d'une cloche verticale d'injection à la base de laquelle se trouve une coupe de bronze, dont l'orifice central laisse échapper une lame d'eau très mince, qui vient se pulvériser sur les parois inclinées de la coupe; la cloche se remplit ainsi d'un brouillard qui condense instantanément la vapeur. Deux pompes à air automo-

trices, équilibrées et pourvues de clapets étagés, servent à l'extraction de l'eau et de l'air du condenseur. Cet ensemble constitue un appareil spécial que l'on peut installer à une certaine distance des moteurs sans trop d'inconvénient; on y perd quelque peu de rendement; mais on gagne, d'autre part, une meilleure utilisation de la place dont on dispose, et il devient possible de donner aux pompes la vitesse qui leur convient.

Les articulations sont lubréfiées par des appareils graisseurs auxquels il est facile d'accéder, même pendant la marche. Ce point est important pour des machines à marche rapide.

MM. Weyher et Richemond n'hésitent pas à garantir, pour leurs machines, une consommation de $6^{kg},5$ par cheval-heure indiqué; s'ils le garantissent, nous pouvons en conclure qu'ils ont obtenu mieux encore.

XIV. **Machine Corliss.** — La maison Le Gavrian, de Lille, qui a passé successivement entre les mains de M. V. Brasseur, et de MM. Crépelle et Garand, partage, avec les ateliers du Creusot, le privilège d'être les seuls concessionnaires des brevets Corliss, et c'est par ces habiles constructeurs que notre pays a été tenu au courant des derniers perfectionnements apportés à l'œuvre primitive de l'illustre ingénieur américain.

1° *Machines Brasseur (Crépelle et Garand, successeurs).*

M. Brasseur exposait, en 1889, une machine de la puissance de 100 chevaux indiqués, avec admission au 1/5, qui reproduisait exactement le type Corliss primitif, à lame de sabre; elle est représentée figure 57.

La distribution, très connue [1], de cette machine est commandée par un excentrique, actionnant un plateau-disque placé à l'extrémité du bâti, en avant du cylindre; celui-ci attaque les quatre tiroirs par des bielles munies d'écrous de rappel et de correction. L'attaque est directe pour les deux

[1] Voir, page 125, les descriptions des diverses distributions Corliss.

tiroirs d'échappement, elle se fait par l'intermédiaire d'un

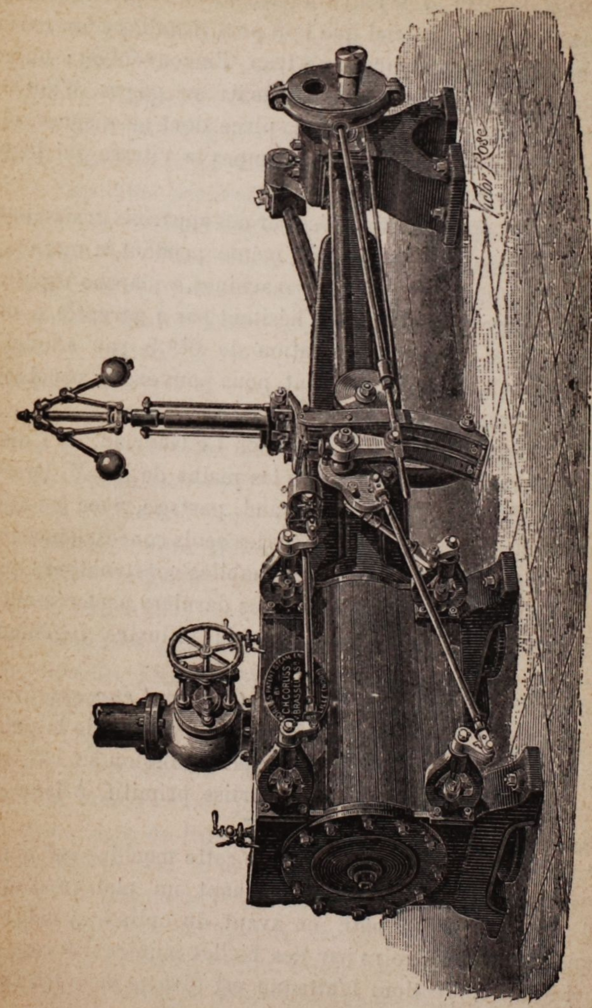


Fig. 57. — Machine Corliss, type 1867 (Crépelle et Garand).

déclic pour l'admission de vapeur. Deux biellettes relient le plateau-disque à deux porte-ressorts, disposés en batterie

l'un à côté de l'autre; deux grandes lames d'acier (ce sont les *ressorts en lames de sabre)* viennent s'appuyer dans une cavité de leurs porte-ressorts respectifs. Les lames se tendent, quand le porte-ressort recule ; elles rappellent ainsi, par leur élasticité, la tige horizontale reliée au tiroir d'admission. Cette tige est poussée en avant quand le porte-ressort avance, grâce à une prise de contact d'une palette de déclic articulée sur l'extrémité supérieure du porte-ressort; mais un butoir, dont la position est déterminée par le régulateur, fait basculer la palette, lui fait lâcher prise sur la tige et permet donc au tiroir de se refermer, en obéissant à l'action du ressort. Nous ne croyons pas devoir insister davantage sur la description de cet ingénieux mécanisme; nous avons seulement voulu expliquer pourquoi ce premier dispositif de Corliss ne permet pas d'opérer de longues admissions, puisque le déclic ne peut fonctionner que pendant la période d'avancement du porte-ressort.

La maison Le Gavrian a acquis une juste renommée pour la perfection avec laquelle elle construit ce type de machine; il est utile de signaler les principaux agencements de détail adoptés en vue de réaliser cette perfection. Le cylindre est à enveloppe de vapeur, rapporté, fixé par un joint au mastic de fonte recouvert d'un cercle en bronze doux, encastré à queue d'hironde et maté dans une rainure venue au tour. Le chauffage de l'enveloppe est effectué par une prise de vapeur spéciale; la vapeur vive produirait sans doute mieux l'effet cherché. Les tiges des tiroirs sont en acier; elles portent une embase qui s'appuie sur une bague en fonte dure, ajustée dans le guide, formant ainsi un joint métallique parfait, dont l'étanchéité est assurée par un rodage incessant; on évite de la sorte les bourrages et tous leurs inconvénients. Comme les tiges restent dans les guides et qu'elles ne traversent plus le tiroir sur toute sa longueur, comme dans les anciennes Corliss, le démontage des tiroirs est rapide et aisé; chaque tige s'engage simplement dans une cavité ménagée à l'avant

du tiroir; une fausse tige, disposée à l'autre extrémité, s'appuie dans le couvercle de fond de la boîte du tiroir. La crosse du piston est en acier et elle fait pièce avec son tourillon découpé dans la masse. La bielle, ainsi que toutes les pièces du mouvement de distribution, sont en acier Martin; tous les axes sont en acier, et ils sont calibrés, trempés et rectifiés après la trempe. Les coussinets et les coulisseaux sont garnis de métal anti-friction. Ces quelques indications suffisent pour justifier l'excellente réputation de ces machines.

MM. Crépelle et Garand, successeurs de MM. Le Gavrian et Brasseur, construisent aussi le type 1884, en machine simple et en Compound, comme on le voit sur le dessin de la page 221.

Le plateau-disque primitif a pris la forme d'une patte d'araignée, c'est-à-dire d'un triangle curviligne dont les côtés se prolongent par quatre longs bras actionnant les quatre tiroirs. L'excentrique attaque le triangle par sa pointe inférieure; l'axe d'oscillation se trouve sur le milieu de sa base, dont la position correspond au milieu du cylindre. Chaque bras est relié à la manette correspondante du tiroir qu'il doit faire mouvoir par une bielle courte, d'une pièce; pour la décharge, cette action est directe; pour l'admission, elle se fait par l'intermédiaire d'un appareil à déclic, dont le principe est facile à comprendre.

La bielle transmet le mouvement de l'araignée à un balancier disposé sur l'axe du tiroir d'admission, mais fou sur cet axe; ce balancier oscille donc, mais il n'entraîne pas le tiroir avec lui. La solidarité est établie entre ces deux organes par un levier, claveté sur l'axe du tiroir, portant une touche d'acier placée en face d'une autre touche articulée sur l'extrémité du balancier fou. Quand les deux touches se rencontrent, le balancier ouvre le tiroir; mais elles peuvent se rencontrer plus ou moins longtemps ou même elles peuvent se manquer; le tiroir est, d'ailleurs, toujours sollicité dans le sens de sa fermeture par un ressort ou un contre-

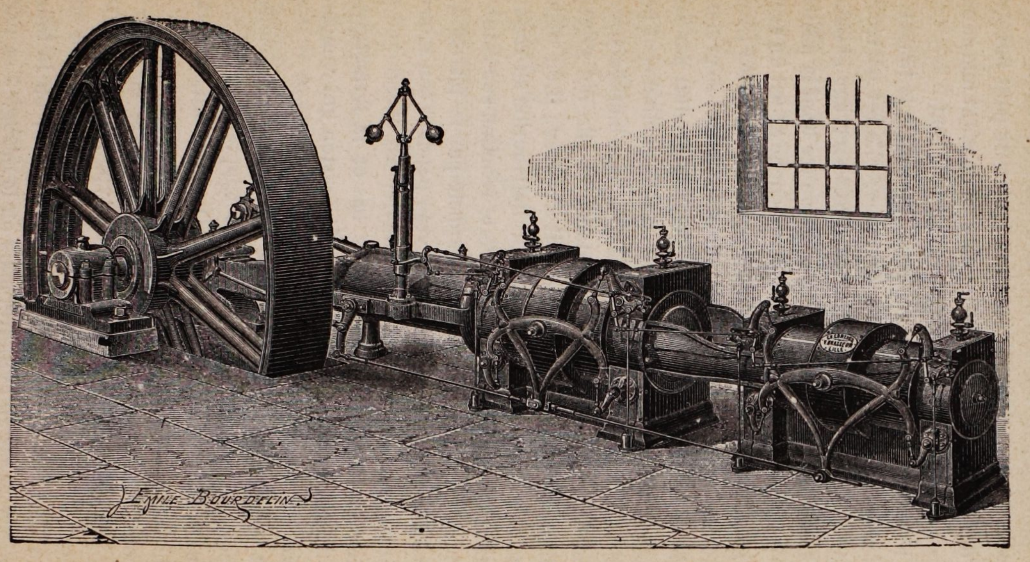


FIG. 58. — Machine Corliss, type 1884 (Crépelle et Garand).

poids attaché sur l'extrémité du levier. Cela posé, on voit sans peine comment fonctionne ce déclic, et nous n'avons plus qu'à dire par quel procédé le régulateur peut faire varier la durée de rencontre des touches en donnant une admission aussi longue que l'exige le travail résistant.

Sur le levier, la touche d'acier est fixe; mais la touche du balancier occupe des positions diverses; elle est portée, en effet, par une pièce mobile, articulée, d'une part, sur le balancier, s'appuyant, de l'autre, dans une rainure dont la position est déterminée par le régulateur. Cette touche décrit un arc de cercle autour d'un centre qui n'est point sur l'axe du tiroir; l'excentricité varie par le régulateur et le contact se prolonge donc plus ou moins de temps. Le déclic se produit par suite sans l'intermédiaire d'aucune came en plan incliné et il peut se régler sans tâtonnement, avec une précision mathématique. L'action du régulateur est instantanée et elle ne s'exerce qu'au moment précis où le déclic doit s'opérer ; il en résulte que l'inertie des pièces qui relient la distribution au régulateur est suffisante pour empêcher toute réaction sur celui-ci.

Le levier d'entraînement est rappelé par le piston d'un cylindre à air dans lequel il fait le vide pendant son mouvement ascendant; au moment où ce levier est abandonné par le déclic, le vide le ramène vers le bas et la fermeture du tiroir d'admission est très rapide. Un piston qui comprime l'air dans un second cylindre fait office de *dashpot*.

Tout cet ensemble constitue un mécanisme extrêmement ingénieux, peu délicat et parfaitement adapté à sa fonction; en un mot, il est digne de Corliss. On l'imitera, et cela a déjà été fait, mais il sera difficile de le surpasser.

La construction des divers organes de cette machine ne diffère pas sensiblement de celle du type 1867 : signalons seulement la facture du piston, qui se compose d'un long bloc de fonte creux, aussi léger que possible; on le tourne au diamètre exact du cylindre, mais on le dégage à sa partie supérieure sur une demi-circonférence, de manière à former

un glisseur de grande surface dans le cylindre. Pour assurer l'étanchéité, un cercle étroit en fonte, en deux morceaux assemblés à couvre-joints et poussés par des ressorts, est logé dans une rainure centrale. Nous ne voyons pas bien les avantages de ce genre de piston sur le piston suédois.

Dans leurs Compounds, MM. Crépelle et Garand font une détente variable dans les deux cylindres : leurs machines y gagnent d'être extrêmement sensibles à l'action du régulateur. Si l'on veut, à un moment donné, rendre la détente fixe au grand cylindre, il suffit de supprimer la liaison entre le régulateur et le déclic et l'on règlera la détente au degré voulu d'une façon invariable : il y a lieu de le faire quand le travail est parfaitement régulier. On cherchera alors à éviter, en marche normale toute chute de pression entre les deux cylindres ; la pression de la vapeur dans le petit cylindre à fin de course, au moment de l'échappement, sera sensiblement la même que celle de la vapeur entrant dans le grand cylindre.

La machine Corliss, soumise, en 1869, à l'examen de l'Institut américain, avait donné les résultats suivants :

MACHINE SANS CONDENSATION

Diamètre du cylindre.	= 16 pouces =	406 m/m
Course.	= 42 — =	1070 m/m
Nombre de tours.	= 60	
Admission.	au 1/5.	
Travail indiqué.	76,58 chevaux.	
Pression de la vapeur	= 5,75 atmosphères.	
Consommation de vapeur par cheval-heure indiqué.	$11^{kg},804$.	

Il faut remarquer que la machine essayée marchait sans condensation ; sa consommation eût été, à condensation, de $8^{kg},5$ de vapeur. Mais aujourd'hui nos constructeurs arrivent à de meilleurs résultats. Des essais faits par l'Association des propriétaires d'appareils à vapeur du nord de

la France sur une machine Brasseur, établie aux glaceries d'Aniche, ont fait constater une dépense de 7^{kg},8 par cheval-heure indiqué, pour une machine simple; une Compound tandem, placée à Fourmies, chez M. Guinotte, et ne marchant qu'à une pression de 6 kilogrammes, a consommé 6^{kg},940 ; une autre Compound, marchant à 5^{kg},75 a dépensé 7^{kg},025. A des pressions plus élevées, les résultats sont meilleurs encore et ils témoignent de la bonne construction de ces machines.

2° *Machines du Creusot.* — MM. Schneider et Cie sont aussi concessionnaires des derniers brevets Corliss pour une grande partie de la France et pour les colonies ; mais ils ne se sont pas contentés de reproduire fidèlement les dispositifs particuliers de ces brevets, ils ont de plus entrepris une série de recherches de précision, dans le but de déterminer les conditions les plus propres à augmenter le rendement de leurs machines et à assurer le minimum de dépense pour une puissance donnée. Ces recherches, poursuivies pendant plus de six mois, en 1883, ont été publiées par A. Delafond, ingénieur des mines [1] ; nous avons déjà signalé ce remarquable travail à nos lecteurs. Les résultats de ces savantes études ont mis les ateliers du Creusot sur la voie de perfectionnements sérieux, dont nous ferons ressortir l'importance.

MM. Schneider et Cie construisent plusieurs types que nous allons décrire.

Le premier se voit sur la figure de la page ci-contre ; il est muni de la distribution *à araignée* de 1879, et nous ne croyons pas qu'il diffère sensiblement du type officiel créé par Corliss.

Une belle machine de ce genre avait été exposée en 1889 ; elle faisait 400 chevaux par un cylindre de 750 millimètres de diamètre et 1400 de course. Le mécanisme de déclic des tiroirs d'admission était exactement semblable à celui que

[1] *Annales des mines*, octobre 1884.

nous avons décrit ci-dessus ; les obturateurs d'admission et de décharge occupaient la même position relative, mais l'axe des derniers avait été légèrement abaissé par rapport à ce qui se faisait précédemment au Creusot.

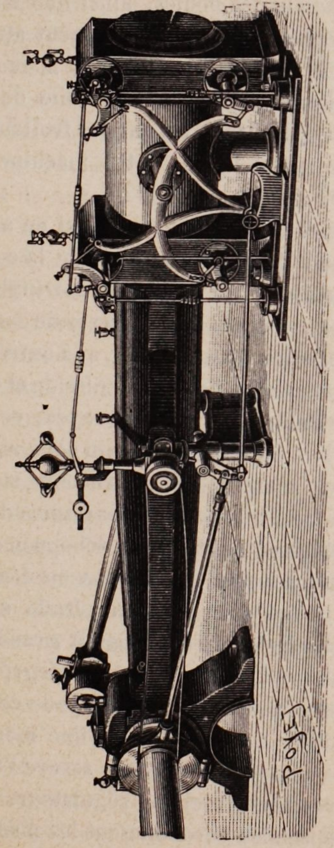


Fig. 59. — Machine Corliss du Creusot.

Le cylindre de la machine était entouré d'une enveloppe plus complète qu'autrefois et d'une plus grande capacité, et une pompe spéciale lui était adjointe pour refouler à la chaudière les eaux de condensation. Les pistons de rappel, le

frein à huile du régulateur étaient disposés au niveau du sol pour faciliter leur surveillance et leur accès. Le régulateur employé était du système Porter, à grande vitesse ; le degré d'isochronisme est ainsi augmenté et les variations de la force vive radiale des boules, ainsi que les oscillations qui en sont la conséquence, sont fortement atténuées. Les glissières étaient à section triangulaire ; nous préférons les glissières cylindriques qu'il est plus facile de centrer par rapport à l'axe du cylindre ; les parties frottantes portaient des garnitures de métal blanc. Cette machine était d'une exécution parfaite.

MM. Schneider et Cie construisent aussi un autre type de Corliss, ne différant du précédent que par la commande des tiroirs. Le plateau-disque est supprimé ; la tringle de l'excentrique vient se poser à cheval sur les axes de deux balanciers dont le point d'oscillation est sur le sol, aux extrémités du cylindre, dans la verticale du tiroir d'admission et de décharge : cette tringle peut facilement être débrayée, ce qui permet de faire marcher le mécanisme à la main pour aider, si besoin en est, à la mise en marche. Ces balanciers sont connectés par des bielles verticales avec les mécanismes d'admission et ils actionnent directement les tiroirs d'échappement. Le déclic est d'ailleurs identique à celui que nous avons décrit ci-dessus.

Le régulateur a fait l'objet d'une étude spéciale ; c'est le régulateur Porter qu'on fait tourner à grande vitesse : un levier de Foucault permet de régler le degré d'inclinaison de ses branches, et le contre-poids mobile de ce levier donne le moyen de modifier à son gré le régime même de la machine. Enfin, une disposition spéciale assure l'arrêt du moteur en cas d'arrêt accidentel du régulateur.

Deux qualités spéciales caractérisent les machines Corliss du Creusot ; elles sont régulières et elles sont robustes.

Leur régularité ressort des applications nombreuses qui en ont été faites pour la conduite des machines électriques destinées à l'éclairage ; citons, entre autres, la belle instal-

lation des *Grands Magasins du Printemps*, dans laquelle 4 machines, d'une puissance effective de 120 chevaux effectifs actionnent 22 machines dynamos, qui alimentent près de 300 foyers Jablochkoff, autant de lampes à incandescence et 4 régulateurs.

Leur construction robuste ne saurait être mieux démontrée que par l'introduction de ces machines Corliss, réputées délicates, dans les forges et les laminoirs : aujourd'hui 7000 chevaux effectifs sont utilisés au Creusot même pour activer les trains de laminoirs ; c'est le plus bel éloge que nous puissions faire de ce type de moteurs, car le travail du laminage soumet les mécanismes aux réactions les plus violentes et à des chocs répétés, et il leur faut une résistance remarquable pour rester ainsi exposés sans protection aucune à la poussière des ateliers sans souffrir de ces conditions excessivement défavorables. Les forges Peugeot frères, les forges de Fourchambault, celles de MM. Campionnet, et d'autres encore, sont mûes par des Corliss du Creusot.

La dépense de vapeur par cheval-heure effectif est d'environ 9 kilogrammes de vapeur.

MM. Schneider et Cie construisent encore une machine Corliss verticale du genre pilon. Le système de distribution et de déclic est à peu près le même que celui des machines horizontales. Les quatre colonnes qui supportent le cylindre et qui reçoivent les glissières sont creuses et à section rectangulaire ; elles sont solidement fixées à la plaque de fondation qui porte le palier moteur ; elles sont en outre parfaitement reliées entre elles dans tous les sens et forment un ensemble extrêmement rigide.

A 70 tours, cette machine développe 1000 chevaux ; le diamètre du cylindre est de 1 mètre et la course de $1^{m},60$; la pression à la chaudière ne dépasse pas 4 kilogrammes.

Ce genre de machines est d'un prix plus élevé que les machines horizontales.

Enfin, pour être complet, faisons mention d'une machine

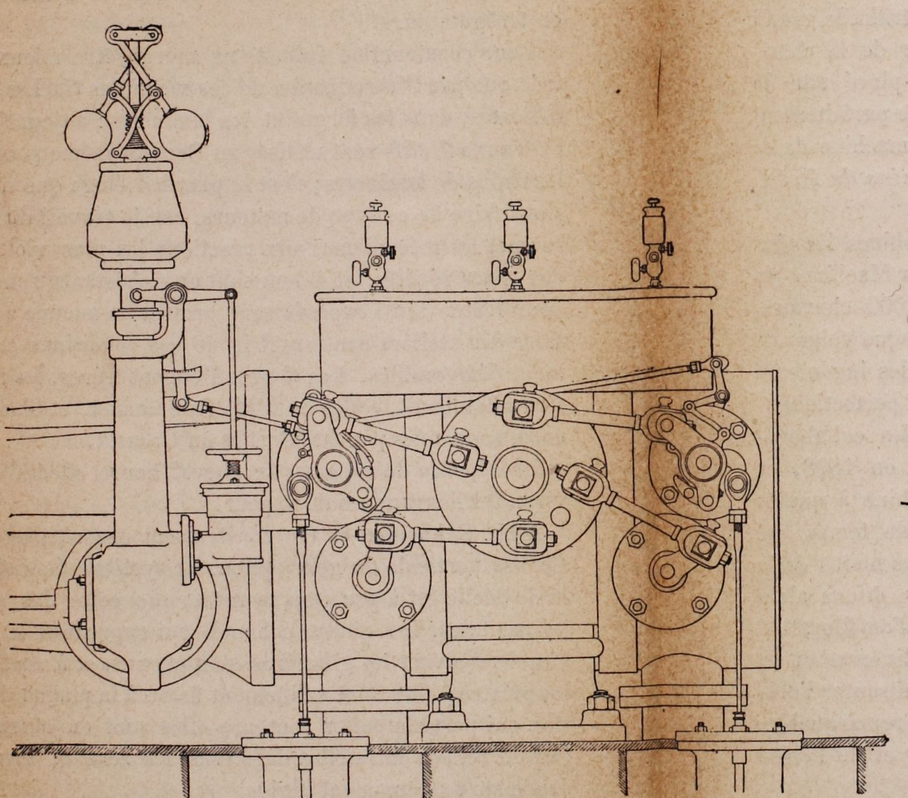


Fig. 60. — Machine Corliss-Farcot.

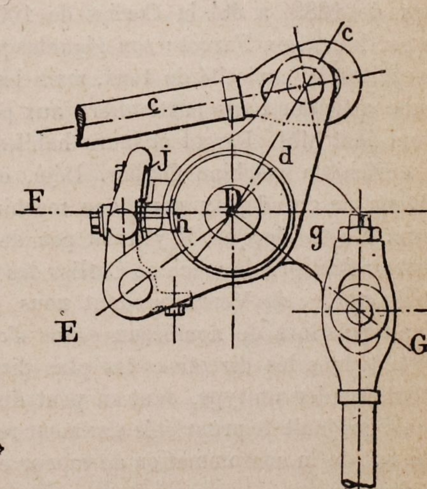


Fig. 61. — Déclic Farcot.

Compound pilon ; la vapeur y est distribuée au grand cylindre par un seul tiroir ; au petit cylindre par un double tiroir Meyer, réglable à la main. Un régulateur Porter agit sur deux soupapes à lanternes équilibrées, placées sur chacune des boîtes à vapeur. Pour faciliter la mise en train, le grand cylindre peut recevoir directement la vapeur de la chaudière. Un seul graisseur à condensation est placé sur la lanterne régulatrice du petit cylindre et assure parfaitement le graissage des tiroirs et des pistons. Une machine de ce type, de 20 chevaux, a été installée aux *Magasins de Printemps*.

XV. **Machine Corliss-Farcot.** — Une des machines les plus remarquées, dans la grande nef de la Halle aux Machines de l'Exposition de 1889, a été la Corliss de 1000 chevaux, construite par la maison Farcot : son gigantesque volant de 10 mètres excitait la curiosité de tous, mais les ingénieurs prêtaient une attention toute particulière aux perfectionnements divers dont MM. Farcot et leurs habiles collaborateurs ont enrichi la machine Corliss. Déjà, en 1878, ils avaient obtenu un grand prix pour une machine à quatre distributeurs. A cette époque, il y avait peu de temps que MM. Farcot avaient pris la machine Corliss des mains de la maison Bède et Cie, de Verviers, dont nous étions alors l'ingénieur ; depuis lors, de nombreux essais d'amélioration avaient été faits dans les directions les plus diverses et ils avaient abouti à créer un type, dont on peut discuter l'originalité, mais qui jouit de propriétés vraiment remarquables au point de vue de la consommation de vapeur et de l'élasticité de puissance.

L'économie est motivée en partie par la réduction des espaces nuisibles. Dans les machines Corliss ordinaires, le volume irréductible de la boîte dans laquelle se meut le levier d'échappement ne permet guère de faire un espace moindre que les 3 ou 4 centièmes du volume du cylindre : il est un peu plus petit dans la Wheelock et dans la machine

Dujardin, parce que ce système ne comporte plus qu'une seule coupure au lieu de deux, mais il ne tombe pas au-dessous de 2 1/2 pour 100 de la cylindrée, et cet avantage est racheté par les condensations produites à la traversée de la boîte d'échappement. MM. Farcot ont réussi à limiter l'espace nuisible à 1 pour 100, en plaçant les tiroirs dans le fond même et dans le couvercle du cylindre. Cette disposition nécessite le démontage d'une partie de la distribution chaque fois qu'on veut enlever le piston ; mais elle présente d'autre part de réels avantages, qui ne font pas regretter la légère complication que nous venons de signaler. Corliss l'a imitée dans son dernier modèle de 1889.

Les ingénieurs de la maison Farcot se sont imposé de réaliser d'une manière complète les conditions suivantes : 1° séparation complète de l'entrée et de la sortie de la vapeur pour éviter les refroidissements ; 2° accélération de l'ouverture et de la fermeture des tiroirs par l'interposition d'un balancier à calage convenable ; 3° arrivée de la vapeur par le haut pour assurer la siccité ; 4° utilisation pour le déclenchement du *retour* aussi bien que de l'*aller* d'un excentrique unique. Grâce à cette dernière disposition, l'admission peut varier de 0 aux 8 dixièmes de la course et il en résulte une élasticité de puissance des plus avantageuses, qui n'entraîne presque pas de variation dans la consommation par cheval.

Arrivons aux détails de construction de la machine Farcot; elle est représentée dans les figures 60 et 61.

Occupons-nous d'abord de l'appareil de distribution. Il rappelle le type Corliss à bielles suspendues, dans lequel le mouvement d'oscillation imprimé par la barre d'excentrique est communiqué à un plateau-disque placé vers le milieu du cylindre : quatre biellettes partent de ce plateau et attaquent les tiroirs d'admission et d'échappement. Soit *c* (fig 61) la bielle d'attaque d'un tiroir d'admission, qui est reliée au levier *d* fou sur l'extrémité de l'axe du tiroir ; ce même levier porte à sa partie inférieure une pé-

dale d'enclenchement constamment sollicitée vers l'axe du tiroir au moyen d'un ressort intérieur. L'axe du tiroir porte encore une manivelle *j*, calée sur sa tige, sur laquelle agit le ressort de fermeture et dont le moyeu présente à côté du levier *d* un grain d'acier *h* correspondant au contact *j* de la pédale. Il est facile à voir que le tiroir se trouvera entraîné ou non dans le mouvement d'oscillation du levier *d* suivant que les pièces *h* et *j* seront en prise ou non.

Pour mettre fin à cet entraînement, à un instant donné, il suffit de forcer la pédale à s'écarter de l'axe du tiroir, en neutralisant l'action du ressort intérieur qui tend constamment à l'en rapprocher ; le déclenchement est produit par deux cames, placées à l'extrémité du support de la tige du tiroir et soumises à l'action du régulateur, qui lui fait prendre diverses positions : les bosses excentrées de ces cames, marchant l'une vers l'autre, viennent se présenter plus ou moins tôt sous l'extrémité d'un appendice latéral dont la fonction est d'écarter la pédale de l'axe. Une des cames agit sur cet appendice pendant l'aller du tiroir, c'est-à-dire pour les petites introductions jusque vers les 3 dixièmes de la course du piston, et l'autre came produit au contraire le déclenchement pendant le retour du tiroir, depuis 3 jusqu'à 8 dixièmes de la course, en agissant sur un appendice mobile intérieur. Lors de l'aller du tiroir, cet appendice mobile intérieur disparait dans l'intérieur du premier, poussé par un plan incliné latéral de la came des grandes introductions ; il évite ainsi la bosse de cette came, qui empêcherait l'action de la première came, par suite de la position que le régulateur lui impose ; l'appendice intérieur, repoussé brusquement de sa loge par un ressort, vient se présenter derrière la bosse de la seconde came pour déclencher à son tour plus ou moins tôt aux grandes introductions.

Cet ensemble est un peu compliqué, mais l'appareil fonctionne bien. Il importe de remarquer que l'organe de déclenchement des grandes introductions n'agit que lorsque la pre-

mière came, chargée des courtes introductions, n'a pas suffi pour déclencher: le plus souvent l'appendice intérieur se transporte librement dans l'espace sans subir aucun frottement.

Un dispositif particulier, que nous renonçons à décrire, empêche tout emballement de la machine en cas d'accident au régulateur.

Il paraît inutile de dire que ces machines sont construites avec la perfection que la maison Farcot sait mettre à tout ce qu'elle fait. Toutes les pièces forgées sont en acier de première qualité et de dureté appropriée à leur fonction ; tous les axes et mannetons sont trempés et rectifiés ; ils sont emmanchés à la presse hydraulique. L'étanchéité des garnitures des tiges des tiroirs est obtenue sans presse-étoupes par l'application de la tige en acier sur l'extrémité de la douille en bronze qui la supporte.

Le palier principal présente une modification intéressante: les coquilles en bronze des coussinets latéraux portent sur leurs guides horizontaux par les deux faces diamétralement opposées d'un cylindre, dont le diamètre est égal à l'écartement des guides. Une cale rigide en acier transmet aux coussinets la pression des vis de réglage : le contact du coussinet est assuré malgré les déplacements verticaux qui peuvent se produire.

La machine Farcot, exposée en 1889, pouvait développer de 500 à 1000 chvaux, en consommant $5^{kg},5$ de vapeur par cheval-heure indiqué ; mais sa puissance pouvait atteindre 1300 chevaux, au prix d'une consommation un peu plus grande, mais toujours inférieure à 7 kilogrammes, ainsi qu'il ressort d'essais faits à l'usine de Saint-Maur. Quinze machines de ce type fonctionnaient alors en donnant pleine satisfaction à tous égards.

XVI. **Machine Corliss de la Société alsacienne.** — La Société alsacienne de constructions mécaniques (Mulhouse, Belfort, Grafenstaden) construit une machine Corliss Compound, munie de la distribution Frikart, qui a été l'objet de sérieuses

recherches en vue d'améliorer ce type et de lui donner toute la perfection qu'il comporte. L'ensemble de cette machine ne présente, il est vrai, aucune disposition bien nouvelle, mais les détails méritent d'arrêter notre attention.

Le cylindre est formé de quatre pièces, un tube central, une enveloppe et deux fonds, portant le tiroir ; le cylindre central est en fonte dure, il est terminé à chaque extrémité par des bourrelets tournés et ajoutés dans le cylindre-enveloppe ; l'assemblage est fait à chaud, sans masticage, ni bague de cuivre. Le tuyau d'arrivée de vapeur aboutit au bas de l'enveloppe, la contourne et se bifurque, à sa partie supérieure, en deux branches aboutissant au tiroir. Les têtes sont boulonnées à l'enveloppe et placées sur deux socles en fonte formant pied au cylindre et servant en même temps de tuyau d'échappement ; ces têtes renferment les tiroirs qui sont placés contre le fond, de manière à réduire au minimum les espaces nuisibles. Cette construction, dont l'idée appartient à MM. Farcot et Bède, présente plusieurs avantages : elle permet d'employer des fontes dures pour les parties frottantes et elle a surtout pour résultat d'obtenir facilement des fontes saines, sans soufflures, exemptes de ces tensions anormales qui existent fatalement dans les pièces compliquées et qui produisent si souvent des fentes. Le bâti qui relie le cylindre au palier est du type à baïonnette, habituellement employé aujourd'hui pour les machines Corliss. Les glissières sont alésées sur deux axes parallèles à l'axe du cylindre et représentent chacune un demi-cercle. Les paliers moteurs ont une large assise ; des chapeaux emboîtent les parois latérales du palier ; l'arbre tourne entre de forts coussinets en fonte, garnis de métal blanc, en quatre parties, avec serrage latéral par deux fortes vis à contre-écrou. Les pistons à vapeur sont de longue portée ; les corps sont tournés à un diamètre plus petit d'un demi-millimètre que le diamètre du cylindre ; on les fait aussi légers que possible et on les guide le plus qu'on peut. Les crosses de pistons sont fort

simples; elles ont la forme d'une fourche portant le tourillon de bielle; la tige du piston est clavetée solidement dans une forte tubulure cylindrique. Le volant est en deux parties, assemblées par boulons à la jante et au moyeu; il porte deux renforts placés à angle droit, équilibrant les manivelles et une partie des pièces en mouvement alternatif. Un rochet, venu de fonte sur la paroi intérieure de la jante. sert à la mise en route. La pompe à air, placée sur la machine, est conduite par un balancier vertical, relié, en haut, à la crosse du piston par une bielle, et attaché, en bas, à la coquille du piston de pompe à air. Celle-ci est horizontale et à double effet, mais ne contient que deux clapets servant au refoulement; il n'existe pas de clapets d'aspiration. Le cylindre de la pompe à air est en communication directe avec le condenseur par une série d'ouvertures rectangulaires pratiquées au milieu de sa longueur. A chaque coup de piston, ces orifices sont découverts par ce dernier, et le mélange d'eau, de vapeur et d'air se précipite dans le vide que le piston laisse derrière lui. En revenant, ce piston recouvre les orifices, comprime le mélange dans le cylindre et le repousse à travers le clapet de refoulement correspondant. La tuyauterie est disposée entre ces organes, de façon à pouvoir marcher facilement avec ou sans condensation, l'échappement se faisant à volonté, au condenseur ou à l'air; de plus, on peut aussi travailler par le petit cylindre tout seul, avec ou sans condensation.

Nous avons insisté sur cette organisation minutieuse et parfaite pour faire apprécier le soin que mettent aujourd'hui les constructeurs à assurer le mieux possible la régularité de marche et la sécurité du fonctionnement. Nous devons reconnaître que des détails que nous avons relevés dans la machine de la Société alsacienne ne lui appartiennent pas exclusivement et qu'on peut les retrouver dans plusieurs machines Corliss des bons constructeurs, car nos grandes maisons sont toutes également soucieuses d'atteindre à la perfection du genre.

La Société alsacienne construit encore d'autres types parmi lesquels nous signalerons une machine horizontale Compound, à deux cylindres superposés, qui a eu un grand succès.

XVII. **Machine Corliss, Berger-André**. — M. Jacques André, de Vieux-Thann (Haut-Rhin, Alsace), avait acquis le monopole de la construction des Corliss, dans l'est et le sud-est de la France; M. Berger-André, qui a continué la brillante tradition de cette maison, a suivi les progrès successifs de la distribution américaine, et il a présenté à l'Exposition une belle Corliss-Compound qui a été considérée, à juste titre, comme un des meilleurs spécimens de ce type.

Comme compound, la machine André offre peu de particularités spéciales ; les manivelles sont calées à 90 degrés ; en sortant du petit cylindre, la vapeur se rend dans un réservoir à double enveloppe, réchauffé directement par la vapeur de la chaudière; de là, elle est distribuée au grand cylindre, à enveloppe, avec détente variable. La vapeur d'échappement va au condenseur placé sous le bâti et commandé par la manivelle elle-même, par l'intermédiaire d'une bielle verticale et d'un balancier horizontal.

Mais nous devons une attention particulière au déclenchement, qui présente des dispositions originales.

La distribution est mûe par un excentrique calé sur l'arbre de couche, à la façon habituelle des machines Corliss; mais la tringle de cet excentrique attaque d'abord le tiroir de décharge, et c'est de là que le mouvement est distribué aux tiroirs d'admission, par de petites bielles verticales.

Le déclic se compose d'un plateau excentré *a* entouré d'un collier *b*, portant un cliquet mobile *c*, qui tourne sur le support creux de la tige du tiroir. Ce cliquet appuie sur une des extrémités d'un levier double *d* calé sur l'axe de ce tiroir. L'autre extrémité de ce levier est reliée à un piston atmosphérique formant ressort, qui assure la fermeture instantanée du tiroir. Le plateau excentré *a* peut prendre diverses

positions déterminées par le régulateur; le collier *b* qui l'entoure est animé d'un mouvement alternatif, reçu de l'excentrique placé sur l'arbre moteur; par son cliquet *c*, il agit sur le levier double *d* et ouvre par son intermédiaire le tiroir d'admission. Dès que le cliquet lâche le levier double, le tiroir retombe. Il ne nous reste donc plus qu'à expliquer comment la durée de ce contact peut varier du chef du régulateur.

Les trajectoires du cliquet et du bouton du levier sont excentrées; leur contact se prolonge plus ou moins longtemps, suivant que cette excentricité est plus ou moins grande; or, cette excentricité est réglée par le régulateur. Il suffit d'un très faible déplacement du plateau excentré pour faire varier beaucoup la durée de l'admission, ce qui assure à la machine une régularité remarquable.

La machine Berger-André est munie d'un certain nombre d'autres perfectionnements heureux que nous devons indiquer sommairement. Le plateau excentré *a* porte sur une came qui, en cas de rupture de la courroie motrice du régulateur, vient soulever le cliquet *c* et empêche dès lors toute introduction de vapeur. Grâce à un artifice ingénieux, l'enclenchement du cliquet avec le butoir du double levier ne peut jamais manquer, ce qui permet de donner à la machine de grandes vitesses: cet artifice consiste en ce que, d'une part, le cliquet reste normal au butoir, et en ce que, d'autre part, il n'y a aucun presse-étoupe sur la tige du tiroir. L'étanchéité est obtenue par un joint métallique, qui n'oppose qu'une résistance minimum au mouvement de la tige. La tige du piston est entourée aussi d'une garniture métallique. Le bouton de crosse est à graissage central. Les têtes de piston portent des glissières réglables au moyen de cuirs qui maintiennent toutes les pièces dans leurs positions initiales. Pour éviter les coups d'eau produits par aspiration de l'eau du condenseur au cylindre, quand la machine fait quelques tours sans vapeur, le constructeur a placé, sur la bâche de condensation, une sou-

pape mûe par un flotteur à soupape; cette soupape s'ouvre quand l'eau s'élève à un niveau déterminé et elle permet une entrée d'air, ce qui empêche le vide d'être plus complet au cylindre qu'au condenseur.

La pompe du condenseur est actionnée dans le sous-sol, par la manivelle motrice.

La machine Berger-André, qui était exposée en 1889, était une machine Compound.

XVIII. **Machine Corliss, Lecouteux et Garnier.** — MM. Lecouteux et Garnier ont modifié le type Corliss 1867 en s'imposant le double objectif de pouvoir allonger l'admission jusqu'aux 8/10 de la course et d'augmenter l'élasticité du moteur. A cet effet, ils ont étudié un nouveau déclic tout en conservant les grands ressorts plats à lame de sabre, qui présentent de grands et sérieux avantages. Il fallait que le déclic pût fonctionner, non seulement dans le mouvement d'avant du porte-ressort, mais aussi dans son mouvement de retour; pour cela, le butoir du régulateur porte trois touches : celle du milieu présente à sa partie inférieure une contre-pente opposée à celle des palettes de déclic. Ces palettes sont munies d'un taquet monté de telle façon que, lorsque le porte-ressort avance, il puisse osciller et s'effacer au contact de la touche moyenne; quand le porte-ressort revient en arrière, ce taquet se redresse et il s'engage sous la touche qui le fera déclencher.

La construction du cylindre de cette machine offre aussi une particularité intéressante : il est formé de trois pièces, une chemise intérieure en fonte dure et une enveloppe en deux parties. La réunion de ces enveloppes se fait au centre, par deux brides tournées, rodées l'une sur l'autre, et boulonnées après emmanchement à chaud de la chemise intérieure.

Voici les résultats d'essais faits à Romilly sur une machine Lecouteux et Garnier de 80 chevaux.

Pression à la chaudière.	$5^{kg},850$
Degré d'admission.	1/2

Travail indiqué.	95,78 chevaux.
Travail effectif.	80,90 —
Rendement organique.	84,6 —
Consommation de vapeur :	
1° Par cheval-heure indiqué. . . .	6^{kg},127
2° Par cheval-heure effectif. . . .	7^{kg},254.

Ces résultats sont excellents et nous dispensent de tout commentaire.

XIX. **Machine Corliss-Dujardin.** — Voici une machine qui semble à première vue (fig. 62) appartenir au genre Wheelock, mais qui est néanmoins bien une Corliss, car ses tiroirs ne sont point coniques, mais cylindriques; ils sont du modèle créé par Corliss en 1860, qui fait ses preuves depuis plus de trente ans. Nous ne blâmerons pas le constructeur de s'en tenir à ce type, dont les avantages compensent certainement quelques inconvénients sur lesquels, croyons-nous, il ne faut pas insister outre mesure. Les quatre obturateurs sont groupés à la partie inférieure du cylindre : ce dispositif correspond à un sérieux perfectionnement des formes du cylindre, car il permet de réduire ses espaces nuisibles, il lui donne plus de solidité, la coupure des lumières étant réduite de moitié, et enfin il se prête bien à l'arrivée de la vapeur par le bas. On pourrait lui reprocher d'avoir une lumière commune pour l'admission et la décharge, ce qui doit être une cause de refroidissement, et par suite de condensation de la vapeur à son entrée dans le cylindre, mais la machine Wheelock se prête à la même critique. Ce groupement des tiroirs entraîne d'ailleurs une simplification dans la commande des distributeurs, ainsi que nous allons le voir.

La barre d'excentrique communique un mouvement de va-et-vient à un levier qui le transmet à son tour, par deux courtes bielles, aux deux tiroirs d'échappement et d'admission, placés côte à côte, l'un contre l'autre; l'oscillation du premier est continue, celle du second est interrompue par le déclenchement opéré entre les pièces de transmission sous

l'action du régulateur. C'est par le déclic que la distribution Dujardin se distingue des appareils similaires.

L'organe de déclenchement est formé d'un gachette rendant solidaire l'axe du distributeur d'admission avec la manette, qui est folle sur cet axe, et par laquelle le tiroir reçoit son mouvement d'oscillation. Il suffit d'exercer sur cette gachette une poussée horizontale de quelques millimètres pour produire son déclenchement et rendre sa liberté au distributeur, qui retombe aussitôt, appelé par un piston pneumatique faisant ressort, à l'instar de toutes les distributions de ce genre. Cette poussée est opérée par les tringles d'un petit excentrique spécial, ayant au plus quelques centimètres d'excentricité, et disposé à côté du grand excentrique: ces tringles rencontrent les gachettes du déclic et leur font lâcher prise à un moment qui dépend de la position du régulateur. Les gachettes sont de forme courbe et elles sont concentriques à l'axe de l'obturateur ; comme le petit excentrique a une avance faible sur la marche du piston, le déclenchement peut avoir lieu dans toutes les positions du piston et la détente peut varier dans les plus larges limites.

Pour opérer le déplacement des tringles, le pendule agit sur une vis à double filet droit et gauche, dont les mouvements angulaires font mouvoir deux écrous; chacun d'eux porte l'axe d'oscillation d'un petit balancier relié d'un côté à l'excentrique de déclenchement et de l'autre à la tringle de poussée des gâchettes. Le rapprochement ou l'éloignement des écrous portant les axes de ces petits balanciers rapproche ou éloigne les tringles des gâchettes, qu'elles rencontrent par conséquent plus ou moins tôt dans leur course. Le moment du déclenchement est ainsi réglé par le pendule, qui par suite de la disposition de la vis et des écrous, ne subit aucune réaction de l'effort du déclenchement qui est produit par le petit excentrique. Cette distribution est très ingénieuse et peut être comparée aux meilleures de ce genre.

Un dispositif spécial très simple empêche la prise du levier

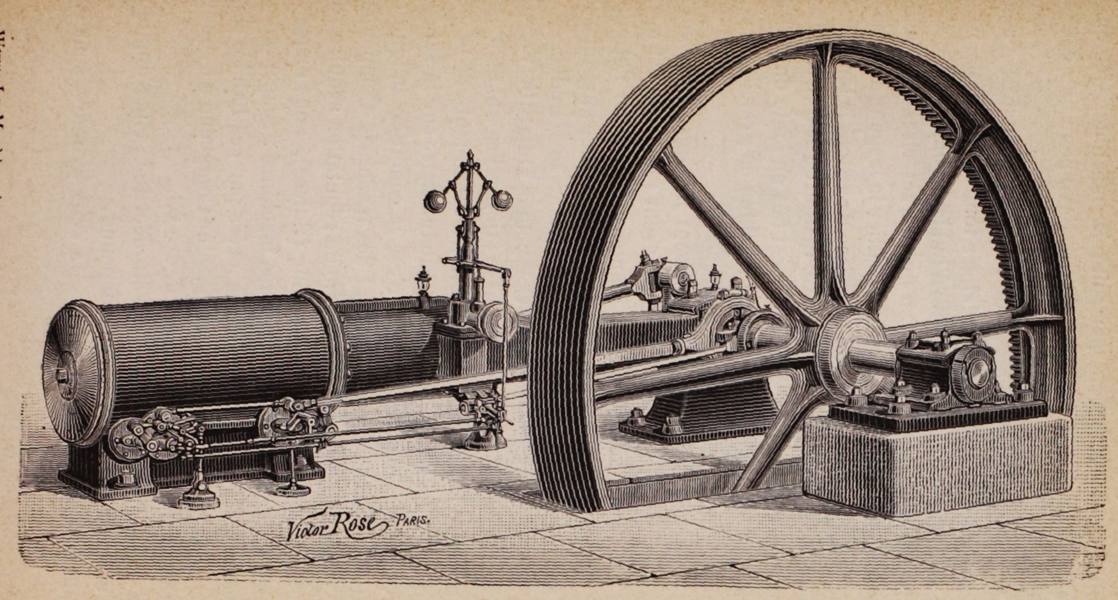


Fig. 62. — Machine Dujardin, de Lille.

sur l'obturateur, et arrête par suite la machine, dès que les bras du régulateur tombent contre l'axe pour une cause quelconque.

La machine que nous venons de décrire a été l'objet d'une étude spéciale, dans le but de réaliser tous les perfectionnements auxquels on demande aujourd'hui la régularité, la douceur, la sensibilité et la précision qui caractérisent les bons moteurs. Nous signalerons en particulier la largeur des glissières, la forme rationnelle de la crosse de piston, la longueur des tourillons et des paliers, etc. Le cylindre est à enveloppe fondue à part ; le cylindre intérieur est fait en fonte dure ; les obturateurs sont rectifiés sur une machine de grande précision, etc.

M. Dujardin emploie le plus souvent la pompe à air verticale placée sous le sol avec le condenseur : la bâche est munie d'une soupape de sureté, manœuvrée par un flotteur, ayant pour objet de provoquer une rentrée d'air, aussitôt que l'eau s'élève trop haut et menace d'envahir le cylindre.

Le *receiver* des machines Compound Dujardin mérite aussi d'être signalé pour ses formes rationnelles, qui assurent de la manière la plus complète l'action réchauffante de la vapeur qui circule à travers son faisceau tubulaire sur la vapeur de décharge du petit cylindre : c'est la condition unique et essentielle du bon fonctionnement des machines Compound.

XX. **Machine Sulzer**. — La grande réputation acquise par MM. Sulzer frères, de Winterthur (Suisse), nous dispense de faire l'éloge de leurs excellentes machines à soupapes.

Parmi les types remarquables créés par ces habiles constructeurs, nous signalerons la machine Compound à cylindre en tandem, représentée dans la figure 63.

La distribution Sulzer a déjà été décrite [1] ; elle s'applique sans difficulté à la marche en compound.

Dans le dispositif en tandem, les deux cylindres sont sur

[1] Voir ci-dessus, p. 129.

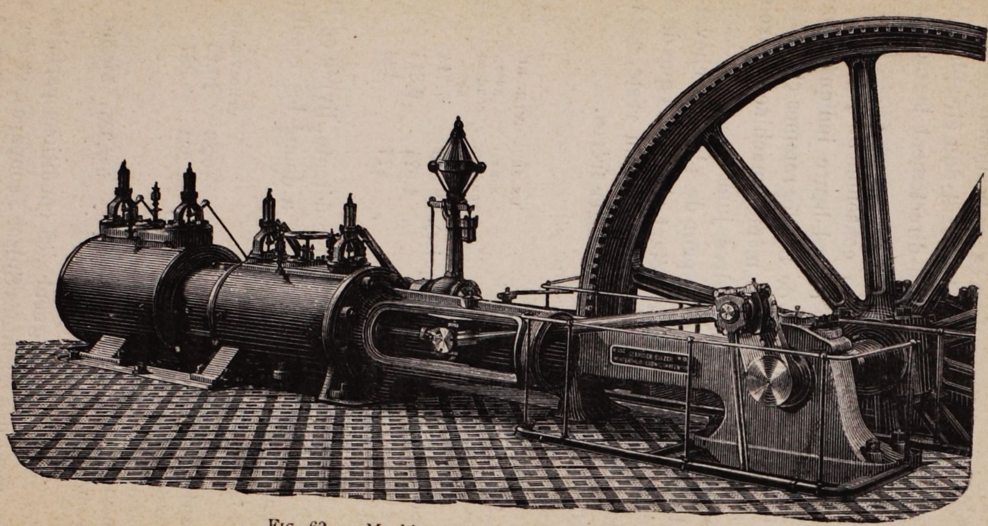


Fig. 63. — Machine Sulzer Compound en tandem.

le même axe et ils agissent sur la même manivelle. Le grand cylindre est en arrière. Ce groupement demande plus de place en longueur, mais il en exige beaucoup moins en largeur; il convient bien quand le volant doit être placé contre un mur ou lorsqu'on accouple directement le moteur sur l'arbre de transmission.

Les Compound Sulzer ne consomment que 6 à 7 kilogrammes de vapeur par cheval-heure indiqué, quand la pression de la vapeur est de 8 kilogrammes et que la machine est à condensation ; les mêmes machines, marchant à détente simple (deux cylindres jumelés, non Compound) exigent 2 kilogrammes de vapeur de plus par cheval-heure indiqué, la pression initiale n'étant alors plus que de 6 kilogrammes par centimètre carré. Voici, du reste, un tableau d'expérience publié par MM. Sulzer frères.

CONSOMMATION PAR CHEVAL-HEURE INDIQUÉ	UN SEUL CYLINDRE sans condens.	UN SEUL CYLINDRE avec condens.	DEUX CYLINDRES COMPOUND avec condens.
	kg.	kg.	kg.
Vapeur (eau de condensation comprise).	9,585	7,714	6,220
Houille (cendres comprises).	1,024	0,814	0,653
Travail indiqué en chevaux.	177	186	372

Une machine Sulzer, à triple détente, livrée en Hongrie, aux moulins de Nagy-Kikinda, a donné les résultats suivants :

	ATMOSPHÈRES		
Pression aux chaudières.	10,33	10,25	10,33
Travail indiqué en chevaux. . . .	383	387	316
Consommation de vapeur par cheval-heure indiqué (eau de condensation comprise).	5kg,325	5kg,390	5kg,430

Ces chiffres témoignent des conditions parfaites du fonctionnement des machines Sulzer à soupapes, et des avantages que ces constructeurs distingués ont su retirer de l'emploi des multiples expansions.

XXI. **Machine de la Compagnie de Fives-Lille.** — C'est une machine à quatre distributeurs plans. Les difficultés de réalésage des tiroirs circulaires justifient, dans une certaine mesure, les efforts des constructeurs tendant à adapter les appareils à déclic à la manœuvre des tiroirs plans. Toutefois, nous ne croyons pas que les avantages de ces tiroirs sur les obturateurs cylindriques tournants soient toujours suffisants pour compenser l'extrême complication d'organes qu'on s'impose quelquefois.

Dans la machine de Fives, la commande de la distribution se fait par l'intermédiaire d'un arbre coudé, placé transversalement au milieu du cylindre, et reposant par ses deux extrémités sur des supports à douilles. Cet arbre reçoit un mouvement oscillatoire qui lui est transmis par l'extrémité de la barre d'excentrique de distribution attaquant le coude. Des bielles articulées symétriquement sur l'arbre font mouvoir deux chariots, disposés symétriquement à droite et à gauche, par lesquels se fait la manœuvre des tiroirs ; chacun d'eux porte à cet effet un talon à déclic articulé, qui pousse le tiroir aussi longtemps que le régulateur permet cette action.

Chaque tiroir d'admission est encadré dans un cadre à douille assujetti sur la tige ; un ressort, fixé à l'intérieur du cadre, maintient le tiroir appliqué sur la glace. La poussée du talon à déclic ouvre la lumière ; le rappel en arrière des tiroirs est obtenu par un piston à air constamment sollicité vers le centre du cylindre par un ressort en spirale, dont on peut faire varier la tension en vissant ou en dévissant le fond de la boîte qui le renferme. Faisons observer, de plus, que chaque glissière de tiroir porte deux prolongements à crochets destinés à ramener le tiroir dans le cas où, une rupture de ressort s'étant produite, le tiroir ne se serait point fermé.

Les tiroirs de décharge sont placés à la partie inférieure des cylindres, ce qui facilite l'évacuation des eaux condensées. Les glaces des tiroirs d'admission et d'échappement

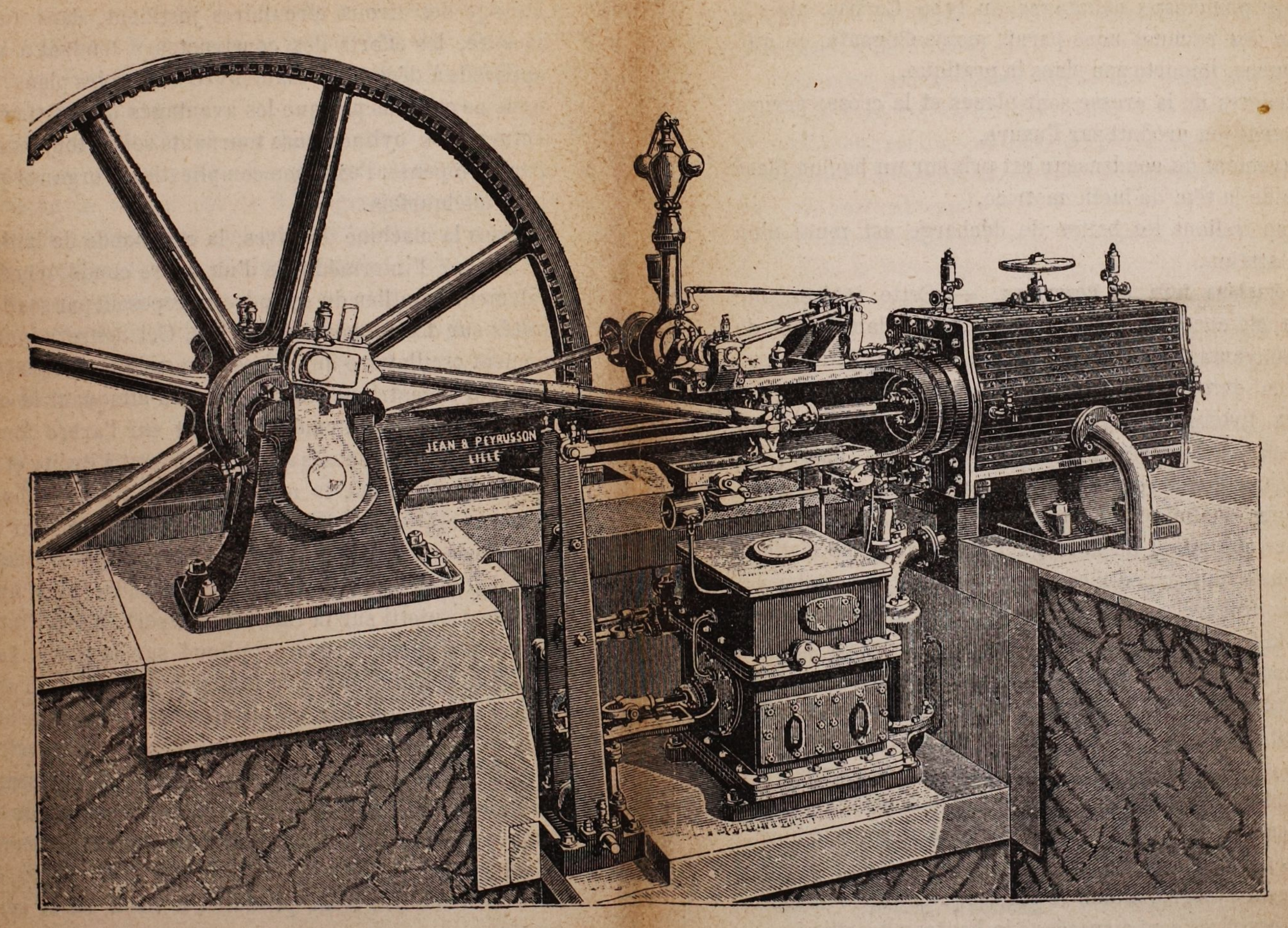


FIG. 64. — Machine Jean et Peyrusson, de Lille (voy. p. 248).

sont aussi rapprochées que possible de l'axe du cylindre pour réduire les espaces nuisibles. En somme, cette machine réalise tous les principaux avantages du type Corliss, mais la disposition des organes nous paraît moins élégante, ce qui, nous l'avouons, importe peu dans la pratique.

Les glissières de la crosse sont planes et la crosse permet de regagner le jeu produit par l'usure.

Le mouvement du condenseur est pris sur un boulon placé en arrière de la tête de bielle motrice.

Le tuyau reliant les boîtes de décharge est muni d'un joint à dilatation.

XXII. **Machine Jean et Peyrusson.** — Cette intéressante machine a été conçue, comme la précédente, dans le but de réaliser les avantages de la distribution et du cylindre Corliss, tout en évitant les inconvénients qu'on reproche quelquefois aux tiroirs circulaires; ses tiroirs d'admission, qui sont disposés aux extrémités du cylindre, sont plans; les tiroirs d'échappement sont plans aussi et à grille.

Les tiroirs d'admission sont commandés par un plateau-disque placé au milieu de la longueur du bâti; une bielle à déclic, animée d'un mouvement de va-et-vient, accroche par la partie supérieure un levier de renvoi de mouvement qui attaque la tige des tiroirs; ce levier est ramené en arrière par une masse pesante qui forme ressort et piston de *dash-pot*. L'agrafage du déclic se fait par son poids; son déclenchement est opéré par un butoir, contre lequel ce déclic vient heurter et dont la position est déterminée par le régulateur. Cet ingénieux dispositif permet une vitesse de 80 tours.

La manœuvre des tiroirs de décharge est tout à fait originale. Ils sont liés tous deux à une tige unique, portant deux leviers d'équerre, munis de galets, qu'on voit bien sur la figure 64; ces tiges sont disposées à la hauteur des glissières. La crosse du piston se termine à la partie inférieure par un plan incliné, venant frapper chaque levier à l'extrémité de sa course; le levier à galets oscille et tire la tringle com-

mune des tiroirs dans un sens ou dans l'autre. Comme les tiroirs sont à grille, il suffit d'un faible déplacement pour obtenir une ouverture rapide et complète qui se fait rigoureusement à fin de course.

C'est aussi par la crosse que se fait l'attaque de la pompe à air, par l'intermédiaire d'un levier à deux flasques de tôle; le condenseur est disposé dans les fondations, entre le cylindre et le palier; la bâche d'injection est détachée de la pompe et disposée verticalement.

La belle machine que nous venons de décrire montre que MM. Jean et Peyrusson ont conservé les traditions de leurs prédécesseurs, MM. Farinaux, Baudet et Boire.

L'emploi des tiroirs plans facilite certainement les réparations, parce que tout industriel peut les faire dès lors avec son personnel.

Chaque tiroir d'admission ayant son excentrique spécial, l'admission peut être prolongée, sous la dépendance du régulateur, jusqu'aux 8 dixièmes de la course ; c'est un avantage appréciable qui permet d'appliquer cette distribution sur le petit cylindre des machines Compound.

L'ouverture instantanée des tiroirs de décharge diminue beaucoup la contre-pression.

Le cylindre est pourvu d'une enveloppe, qui est traversée par la vapeur d'alimentation de bas en haut, avant qu'elle ne pénètre dans le cylindre; la purge de l'enveloppe doit retourner au générateur.

MM. Jean et Peyrusson construisent aussi des machines à balancier avec détente variable par le régulateur, et des machines à piston Compound avec détente variable au petit cylindre.

XXIII. **Machine Wheelock.** — L'Exposition de 1867 a révélé à l'Europe la machine Corliss ; onze ans après, le nom et l'œuvre de l'ingénieur américain avaient fait le tour du monde, et l'Exposition de 1878 était signalée par l'apparition d'un nombre considérable d'imitations et de contrefa-

çons plus ou moins audacieuses, et de perfectionnements plus ou moins heureux de la machine à quatre tiroirs circulaires et à déclics placés sous la dépendance du régulateur. Parmi ces perfectionnements, on remarqua tout particulièrement la machine de L. Jerome Wheelock, de Worcester (Massachu-

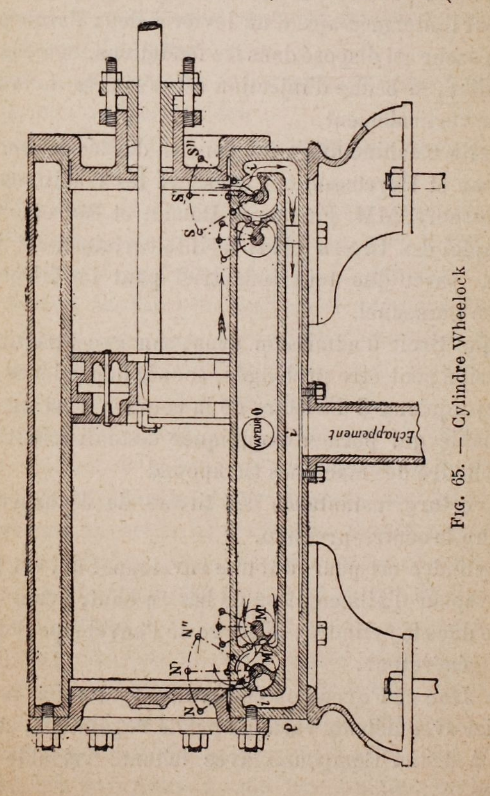


Fig. 65. — Cylindre Wheelock

setts, Etats-Unis), qui obtint le grand prix de la classe. Ce qui frappait le plus dans ce nouveau moteur, c'était la simplicité relative des organes de distribution, la régularité de sa marche, le bas prix auquel on pouvait le vendre et l'économie de consommation garantie par le constructeur : joignez

à cela un autre aliment à la curiosité, résultant de l'aspect exotique et tout américain de cette machine.

La machine Wheelock, de 1878, différait de la machine Corliss en ce que l'admission de la vapeur et son échappement se faisaient par un seul orifice placé à l'extrémité et à la partie inférieure de chaque côté du cylindre, ainsi qu'on le voit sur la figure 65, représentant une coupe longitudinale du cylindre : il ressortait de cette disposition un avantage, consistant dans une réduction notable de l'espace nuisible,

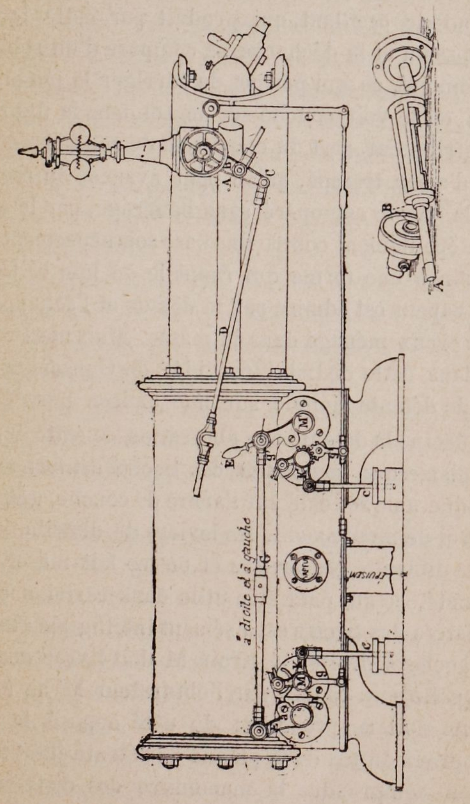


Fig. 66. — Distribution Wheelock.

et un inconvénient résultant de cette communauté de fonction d'un même orifice, qui est refroidi par la vapeur de décharge et qui produit une condensation notable de la vapeur admise. Quelques-uns prétendent que l'avantage compense largement l'inconvénient.

Le distributeur oscillant, qui produit par cette lumière unique l'admission et la décharge, se compose d'un robinet à très faible conicité, ce qui permet de corriger le jeu produit par l'usure : on le voit couché sur le sol dans la figure 66. L'axe du distributeur sort du couvercle de son boisseau par une virole d'acier trempé, qu'on peut avancer ou reculer ; le joint de la virole est opéré sans bourrage, par le simple contact d'un épaulement contre une base soigneusement tournée. Ce tiroir a une forme qui rappelle de loin le tiroir à coquille ; la vapeur est admise par le dessus et l'échappement a lieu par le creux ménagé dans la masse. Mais nous retrouvons aussi dans cette distribution l'idée de Gonzenbach, car une plaque de détente appuie sur une cloison percée d'une lumière et effectue la détente par obturation de cette lumière.

Le mécanisme qui commande ces tiroirs est fort simple ; un excentrique unique, calé sur l'arbre de couche, gouverne, par un renvoi de mouvement, les leviers de distribution ; on débraie sans difficulté ces leviers et on les fait marcher à la main à volonté, ce qui peut être utile dans certains cas. La position relative des tiroirs est aisément intelligible : le piston allant de gauche à droite, le tiroir M doit livrer accès à la vapeur, laquelle sera coupée par l'obturateur M′ au moment où la détente doit se produire ; du côté opposé, la vapeur traverse le creux du tiroir, la plaque de détente étant fermée.

Pour bien comprendre la manœuvre des distributeurs, concentrons d'abord notre attention sur la commande générale des tiroirs de droite et de gauche ; supposons la bielle à encoche DC, emmanchée sur le bouton E, de manière à ce que les boutons E oscillent en même temps sous la commande de l'excentrique. Les tiroirs prennent donc un mouvement

alternatif et ils distribuent la vapeur à l'instar d'un tiroir à coquille. Le mouvement des robinets de détente, qui limite l'admission, est obtenu par la traction même du levier *a* E sur la branche verticale du levier calé sur l'axe de ces robinets ; une touche vient tirer sur une saillie et le robinet est entraîné, alors que les tringles KC et les poids qui y sont suspendus le sollicitent sans cesse en sens inverse, et le fermeront dès que la touche aura quitté la saillie sur laquelle elle fait prise. Mais la durée de la traction de la touche est limitée par le régulateur ; en effet, une tringle horizontale *e* vient attaquer le levier pendant *g*, muni d'un ergot à sa partie supérieure ; cet ergot relève la touche et lui fait lâcher prise au moment voulu.

Un dispositif ingénieux, maintes fois reproduit depuis, fait arrêter la machine dès que la courroie du régulateur tombe ; c'est précisément par le déplacement de l'ergot décrit ci-dessus que ce résultat est obtenu.

Les glissières des machines Weelock sont cylindriques ; la crosse et son boulon sont en fonte et d'une pièce, ce qui est un détail curieux, appartenant en propre aux machines américaines.

Dès 1878, on garantissait une consommation de 850 grammes de charbon par cheval-heure dans certaines conditions de puissance et de marche.

La machine Wheelock est construite avec grand succès par la maison Le Gavrian, de Lille, reprise aujourd'hui par MM. Crépelle et Garand, successeurs de M. Victor Brasseur.

Les avantages des machines Wheelock ont aussi décidé M. de Quillacq, d'Anzin, à joindre ce nouveau genre de construction aux machines à soupapes Sulzer, qu'il construisait déjà depuis plusieurs années. Il a adopté le dernier modèle Wheelock, à tiroirs plans, avec grilles, au lieu des robinets coniques du premier type ; la machine Wheelock ainsi modifiée mérite encore d'être classée parmi les bons moteurs à déclic, bien qu'elle soit l'objet de plusieurs critiques fondées.

Dans ce modèle, comme dans l'ancien, il se trouve, à chaque extrémité inférieure du cylindre, deux ouvertures légèrement coniques, dont l'une renferme le tiroir principal et l'autre le tiroir de détente ; mais ces ouvertures reçoivent des pièces de fonte, qu'on y chasse par un coup sec et qui s'y fixent par coïnçage, et c'est dans ces pièces ainsi rapportées que sont percées les lumières, sur une glace plane qui servira de siège aux tiroirs. L'avantage de ce dispositif est le suivant ; les tiroirs coniques sont supprimés et remplacés par des tiroirs plans, d'autant plus faciles à réparer qu'on peut les tirer de leur loge avec leur siège, les examiner et les gratter à l'aise. Les tiroirs plans sont conduits absolument comme les tiroirs des anciennes machines, seulement le grillage des lumières a permis d'obtenir des ouvertures rapides par des déplacements absolument minimes. On a accusé ces grilles de s'user rapidement, mais les constructeurs se sont défendus de cette imputation en montrant des appareils en bon état après quatre ans de service. Il est à craindre néanmoins que, par suite de leur faible recouvrement, les tiroirs ne restent pas toujours aussi étanches.

On objecte aussi au nouveau type Wheelock les inconvénients qui peuvent résulter de ce que toutes les articulations des tiroirs sont placées en pleine vapeur.

M. de Quillacq avait exposé, en 1889, une machine Compound de 300 chevaux, munie de deux condenseurs, actionnés directement par les tiges de piston ; l'un d'entre eux devait servir en marche normale, l'autre était destiné à la marche avec un seul cylindre.

On a, dans ces derniers temps encore, apporté un perfectionnement aux machines Wheelock, en relevant les tiroirs d'échappement jusque dans les couvercles mêmes des cylindres ; l'espace nuisible a pu être ainsi réduit notablement et son volume ne dépasse pas le centième du cylindre. Il en résulte assurément une économie ; mais il paraît assez diffi-

cile de l'évaluer, car l'influence des espaces nuisibles dépend de nombreux facteurs.

XXIV. **Machine Biètrix**. — C'est une machine à distributeur rotatif; cet organe nouveau mérite l'attention des ingénieurs.

Il se compose d'un robinet muni d'ouvertures et de cloisons convenablement disposées, animé d'un mouvement de rotation uniforme et faisant le même nombre de tours que l'arbre moteur. On lui donne une légère conicité pour permettre de rattraper le jeu produit par l'usure; la vapeur le tient constamment appuyé contre une butée extérieure à réglage facile. Le seul frottement est celui des deux presse-étoupes traversés par l'axe du robinet: observons de plus que le premier tend à décoller le robinet du boisseau, ce qui réduit encore le frottement et empêche tout grippage. Le robinet est commandé par deux roues hélicoïdales, de même diamètre, dont l'une est fixée sur l'arbre moteur et l'autre sur l'axe du robinet prolongé. Le robinet porte, sur son plus faible diamètre, une partie cylindrique percée de deux petites fenêtres opposées par lesquelles entre la vapeur; sur cette partie cylindrique s'emmanche à frottement doux un boisseau muni également de deux fenêtres opposées, mais plus larges; on règle la distribution en modifiant l'orientation du boisseau à la main ou automatiquement par le régulateur.

Cette distribution règle d'elle-même la détente sous l'action du régulateur par le dispositif suivant, qui est vraiment original. Le régulateur porte deux disques horizontaux glissant sur son arbre vertical à 12 centimètres l'un de l'autre, tournant avec lui et s'élevant ou s'abaissant d'une pièce quand les boules s'écartent ou se rapprochent: un galet vertical, de 10 à 11 centimètres de diamètre, est placé entre ces disques, et il est entraîné par frottement dès qu'il est au contact de l'un d'eux, de telle sorte qu'il tourne dans un sens ou dans l'autre, suivant qu'il touche l'un ou l'autre. La rotation de ce galet a pour effet de faire tourner une vis dans

un écrou fixe; il en résulte donc un mouvement d'ascension ou de descente du galet. En même temps, la rotation de l'axe se transmet par une vis hélicoïdale au boisseau de distribution. Voici dès lors comment l'appareil fonctionne : si la vitesse de la machine augmente, le régulateur fait monter les disques; le disque inférieur touche le galet et le fait tourner; en même temps la vis tourne aussi et modifie l'ouverture du boisseau de détente. Mais la vis, en tournant, a monté elle-même, le galet perd son contact et garde la position convenant à la vitesse de régime. La régularité ainsi obtenue est satisfaisante.

Le régulateur est à quatre boules; chaque boule a la forme d'un galet circulaire évidé sur les trois quarts de sa surface, le dernier quart étant lesté par du plomb; la partie évidée porte des dents, qui engrènent avec une crémaillère circulaire creuse occupant le centre de l'appareil et se mouvant avec lui, portée elle-même par un arbre vertical. Le tout est renfermé dans une boîte circulaire munie de nervures qui reçoivent les axes des galets. Quand la vitesse augmente, les galets tendent à tourner autour de leur axe; ce mouvement a pour effet un soulèvement de tout l'appareil qui est entraîné par la crémaillère.

M. Biétrix a fait connaître le résultat d'expériences effectuées à la manufacture nationale d'armes de Saint-Etienne, sur une machine Compound de ce système, alimentée de vapeur sous la pression de 12 kilogrammes ; la puissance effective mesurée au frein étant de 85 chevaux, la consommation de vapeur s'est trouvée égale à 10 kilogrammes par cheval-heure et celle de charbon à 1175 grammes.

CHAPITRE IX

MACHINES A GRANDE VITESSE

Les grandes vitesses furent d'abord préconisées par les ingénieurs, en considération de leur marche économique, mais les progrès de l'électricité les imposent aujourd'hui en dehors de toute autre idée théorique, et l'on a été amené à des vitesses de 300, voire même de 400 tours et plus : on actionne ainsi les transmissions de commande des dynamos et l'on supprime en bien des cas cette transmission intermédiaire qui absorbe inutilement de l'énergie.

Les machines employées sont le plus souvent verticales, mais on en fait aussi du type horizontal.

I. **Machines verticales** *(Lecouteux et Garnier, Hoffmann, Boulet, Hornsby, Weyher et Richemond, Buffaud et Robatel, etc.).* — La maison Lecouteux et Garnier construit avec succès des machines à pilon, dont la vitesse varie de 600 tours à 300 tours, pour des puissances de 10 à 150 chevaux, et qui peuvent être mises à condensation quand on le désire.

Le tiroir de ces moteurs est cylindrique ; il se compose de deux parties distinctes, munies de segments de fonte et reliées par un axe ; le bloc du cylindre supérieur est tourné à un diamètre plus grand que celui du cylindre inférieur, de manière non seulement à équilibrer le tiroir, mais encore à compenser son poids.

L'arbre de couche n'est pas à vilebrequin, mais il est formé de deux morceaux, sur lesquels sont calés des plateaux-manivelles en acier, reliés entre eux par un tourillon sur lequel la bielle vient s'articuler : l'arbre est donc fait en cinq

pièces ajustées. Le montage de ces pièces doit être effectué avec une extrême précision. On cherche par dessus tout à équilibrer rigoureusement le poids de tous les organes en mouvement, au moyen d'évidements pratiqués dans la masse des plateaux, qu'on remplit de plomb. Tous les tourillons sont trempés et rectifiés avant ajustage, puis on finit l'arbre comme s'il était d'une venue. Le régulateur n'est pas sans analogie avec celui d'Armington, mais il en diffère en ce que l'excentrique fait partie intégrante de la masse soumise à la force centrifuge laquelle est placée contre le moyeu du volant. Cette masse est attachée à un grand ressort double en arc : en marche, le contre-poids s'éloigne du centre, comprime le ressort et déplace l'excentrique de manière à diminuer l'excentricité. La détente varie donc avec la vitesse; mais un frein à graisse fluide empêche des variations trop brusques. Nous avons été à même de constater par nous-même la parfaite régularité de cette machine qui fonctionne avec une grande douceur, sans chocs ni trépidations, et avec une usure relativement faible : l'échauffement des articulations est négligeable, grâce à des coussinets de métal blanc d'excellente qualité.

La machine Hoffmann était exposée, en 1889, par les ateliers d'Œrlikon (Suisse) et elle a été l'objet d'une attention méritée de la part des ingénieurs compétents; on la fait à un seul cylindre ou à deux cylindres Woolf; le condenseur, quand il y en a un, est placé sur le côté et il reçoit le mouvement d'un excentrique calé sur l'arbre moteur. Les constructeurs ont cherché à alléger le plus possible les pièces mobiles; ainsi les pistons sont en acier fondu et de forme conique; les crosses et les tiges sont percées de trous le long des axes, etc.

Les tiroirs sont circulaires : quand on veut faire de la détente, et c'est le cas du petit cylindre des machines Woolf, on emploie deux tiroirs concentriques engagés l'un dans l'autre; le premier joue le rôle du tiroir principal de

Meyer, le second remplit l'office de la plaque obturatrice, et il règle le commencement de la détente, en fermant la lumière percée dans le premier tiroir. Le tiroir est sous la dépendance d'un régulateur, qui dérive encore de celui d'Armington, quoiqu'il en diffère notablement par la disposition des pièces. Un ressort unique, en forme de boudin, agit également sur deux masses soumises à la force centrifuge et les attire vers le centre, par des leviers ; l'excentrique est mobile et change d'excentricité avec la vitesse de rotation.

MM. Boulet et Cie ont aussi étudié un type de Compound-pilon à grande vitesse qui mérite d'être décrit ici : le bâti est creux à formes droites ; il porte les glissières et les paliers de l'arbre moteur ; les tiroirs sont cylindriques, doubles et équilibrés par leur différence de section. Le régulateur, qu'on peut voir dans l'intérieur du volant sur la figure 67, agit directement sur l'excentrique de distribution du petit cylindre ; il est formé de deux masses plombées, articulées par des axes fixes. Ces masses agissent, au moyen de deux biellettes, sur l'excentrique de distribution, qu'elles font tourner sur une partie excentrée du moyeu. Enfin, deux ressorts à boudin ramènent constamment les masses vers le centre. En somme, le principe de ce régulateur est toujours le même, mais la forme de l'appareil est modifiée. Toutes les articulations sont soigneusement rodées, les axes étant cémentés et trempés. Ces machines ont été adoptées pour les stations d'électricité.

La machine Hornsby est construite spécialement pour l'éclairage électrique à bord des navires : elle fait de 450 à 400 révolutions, pour des puissances comprises entre 4 et 12 chevaux. La figure 68 permet de se rendre compte de sa forme et de ses dispositions : le cylindre est porté par un pilone massif en fonte, formant corps avec le socle et les paliers de l'arbre coudé. L'arbre, les tiges et les bielles sont en acier ; la crosse se meut dans une glissière ajustable.

Les lumières d'admission et de décharge sont d'une section

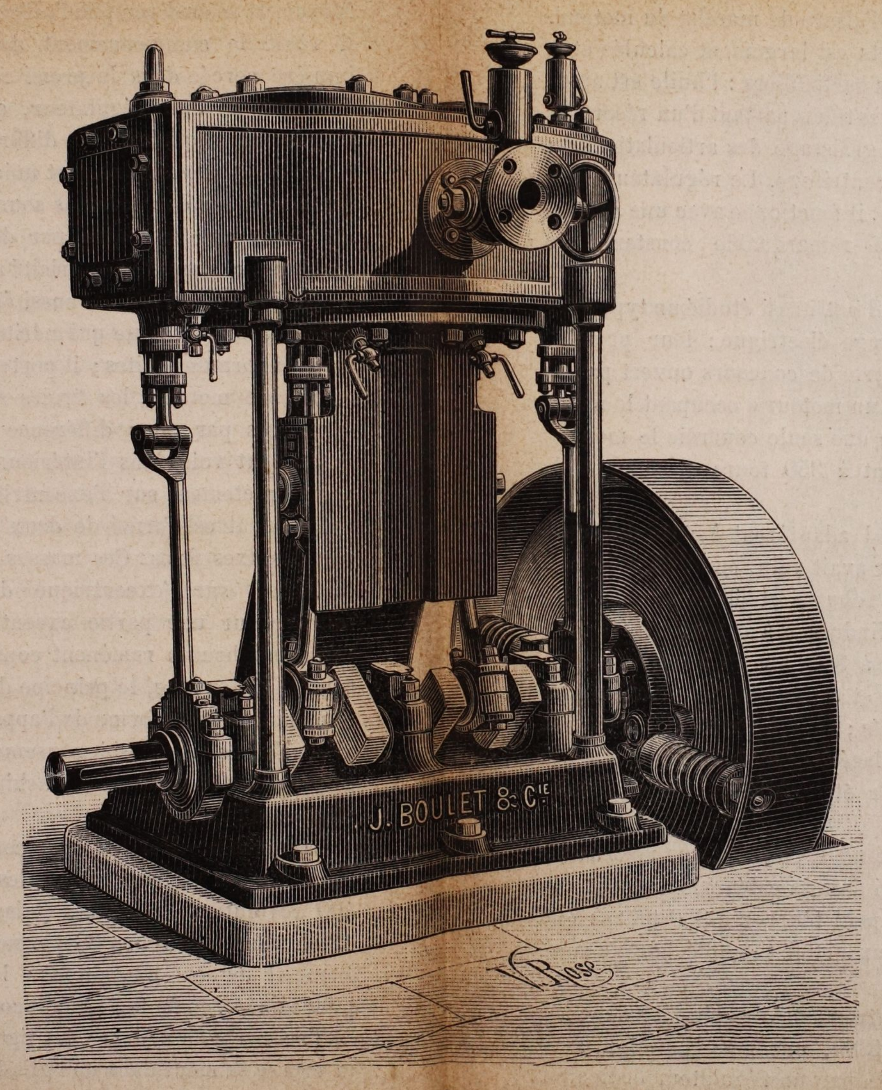


Fig. 67. — Machine Boulet Compound.

exceptionnelle, nécessitée par l'allure de marche du moteur. La portée de tous les coussinets est largement calculée et le graissage a été l'objet de soins particuliers : l'huile est amenée aux pièces frottantes par des tubes partant d'un réservoir placé à l'arrière du pilone, le graissage des articulations du coudé est assuré par la force centrifuge. Le régulateur est à ressort et, quoique fort simple, il fonctionne avec une grande sensibilité et maintient une remarquable constance de vitesse.

MM. Weyher et Richemond ont aussi étudié un type vertical Compound pour l'éclairage électrique : leur premier essai fut provoqué par une sorte de concours ouvert par la Société Edison, qui demandait un moteur « occupant le moins d'espace possible, donnant par une seule courroie le mouvement à une dynamo tournant à 350 tours et susceptible d'absorber 140 chevaux ».

MM. Weyher et Richemond adaptèrent à cette demande le moteur Compound qui leur avait valu, en 1878, le grand prix de mécanique : un bâti robuste et élégant porte, à sa partie supérieure, les deux cylindres et à sa partie inférieure l'arbre à manivelles doubles, à 90° l'une de l'autre. Le devant de la machine est ouvert et accessible ; les distributeurs sont cylindriques et équilibrés ; la vitesse de 160 tours est maintenue par un régulateur placé dans le volant, qui présente cette particularité de pouvoir être réglé à volonté à toute vitesse.

La machine Compound Buffaud et Robatel, que nous avons décrite plus haut, rentre aussi dans la catégorie des moteurs à grande vitesse, puisqu'elle peut tourner à 300 tours : elle a été appliquée avec succès aux installations d'éclairage électrique.

Signalons enfin quelques autres machines du même genre : MM. Farcot ont exposé, en 1889, une machine pilon, avec distribution Solms gouvernée par un régulateur ordinaire, dont la puissance est amplifiée par un servo-moteur. La

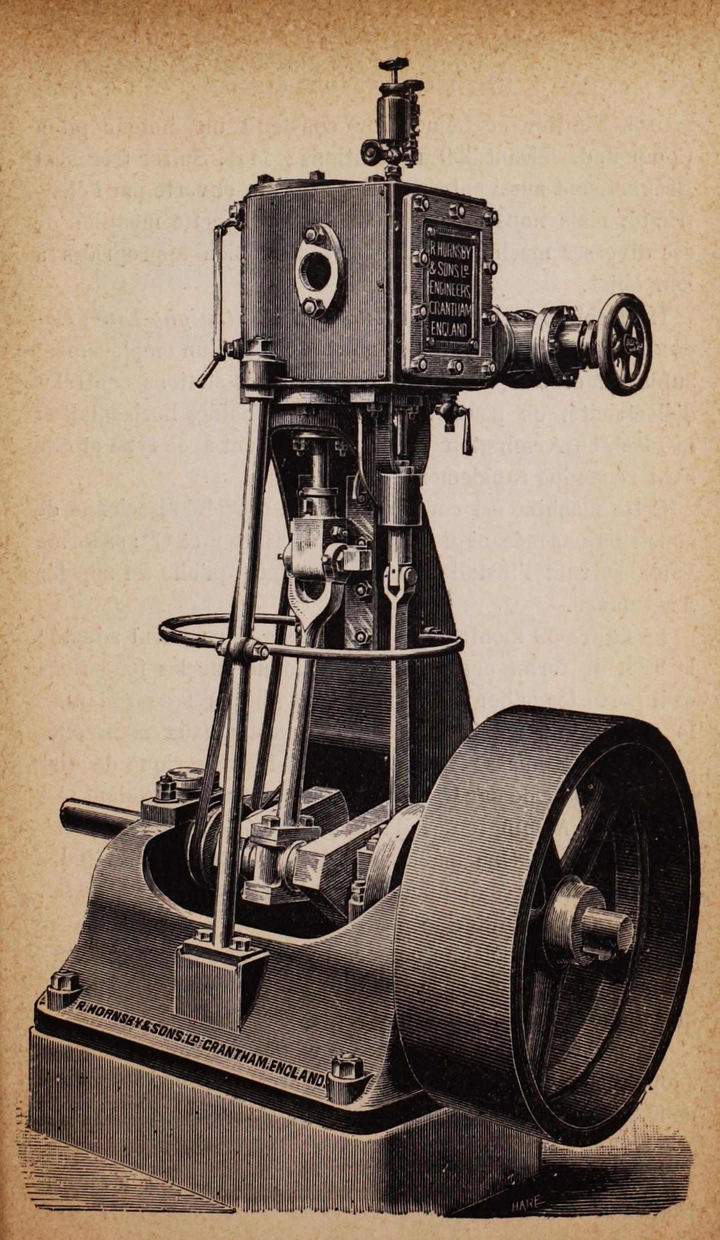


FIG. 68. — Machine Hornsby.

maison Sautter et Lemonnier construit un moteur pilon Compound, faisant 350 révolutions ; MM. Sulzer frères et Bréguet sont aussi entrés dans cette voie ouverte par l'électricité, mais nous devons nous borner à cette mention de ces diverses machines qui sont toutes bien appropriées à leur objet.

II. **Machines horizontales** *(Armington, Straight-Line, Lecouteux et Garnier).* — Quand on dispose d'un emplacement suffisant, et c'est le cas de la plupart des stations centrales d'électricité, on peut employer des machines horizontales : la machine Armington et Sims appartient à ce type et elle s'est répandue rapidement.

Cette machine est construite par la Société alsacienne de constructions mécaniques et par MM. Matter et Cie : sa forme varie suivant l'installation des dynamos qu'elle est appelée à actionner.

La figure 69 montre le type le plus généralement adopté ; le bâti, de forme compacte est boulonné sur les fondations et il porte les paliers de l'arbre ; les glissières sont planes ; le vilebrequin est constitué par deux plateaux-manivelles entre lesquels passe la tête de bielle. L'excentrique de distribution est calé sur le bout de l'arbre, contre le volant. Le régulateur Armington [1] déjà décrit est placé dans l'une des poulies-volant. Une machine de 100 chevaux a un cylindre de 370 millimètres de diamètre, de 380 de course, et elle fait 250 tours par minute.

La Société alsacienne construit aussi une machine Compound qui est disposée pour conduire une forte dynamo placée directement sur l'arbre moteur.

Très répandue en Amérique, la machine Armington a été adoptée par la plupart des stations centrales, parmi lesquelles nous citerons celles de Lyon, Nancy, Mulhouse, Milan, etc.

[1] Voir, page 162, pour le régulateur, et page 151, pour les dispositifs du tiroir Armington.

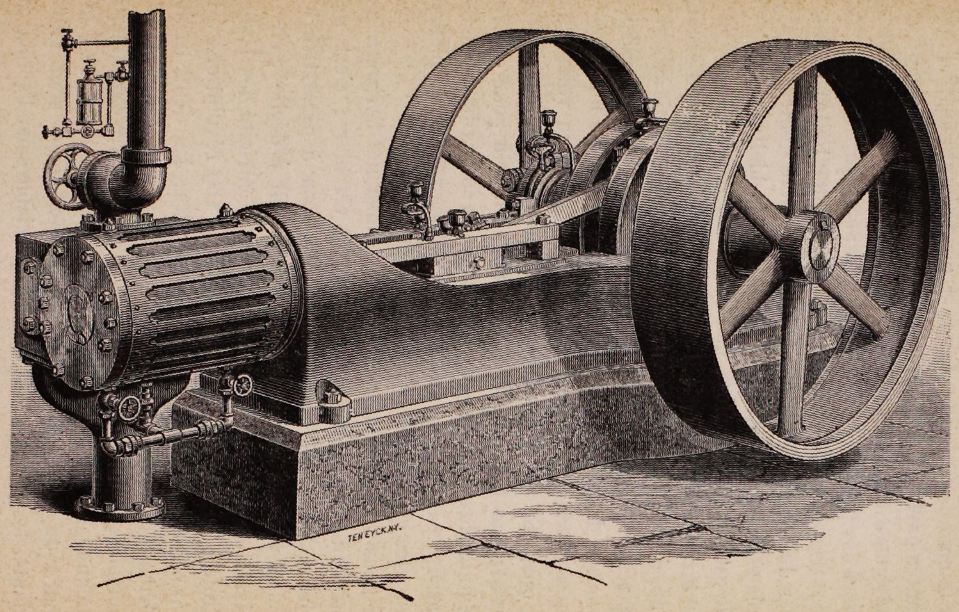


Fig. 69. — Machine Armington-Sims.

MM. Steinlen et Cie (ancienne maison Heilmann-Ducommun) de Mulhouse ont adopté le moteur américain connu sous le nom de *Straight-Line*, et qui présente aussi d'intéressantes particularités de construction en même temps que de sérieuses qualités. Le bâti va en s'élargissant jusqu'au support des paliers de l'arbre moteur ; en plan, il a donc une forme triangulaire. L'arbre porte, comme toutes les machines de ce genre, deux plateaux-manivelles entre lesquels est placé le bouton sur lequel s'articule la bielle ; la tête de bielle est du type employé dans la marine.

Le tiroir est équilibré ; il reçoit le mouvement d'un excentrique, de calage et d'excentricité variables, soumis à l'action d'un régulateur à force centrifuge placé dans le volant, suivant le dispositif en usage dans ce genre de machines : nous y voyons un ressort, fixé sur la jante du volant, qui met obstacle au déplacement centrifuge d'une masse dont l'excentrique fait partie. Il faudrait un dessin pour décrire les détails de cet organe. Le graissage des collets du manneton est assuré par un tube, dirigé suivant les rayons du plateau manivelle, qui lui apporte l'huile d'un réservoir.

Il nous reste enfin à signaler une machine horizontale à grande vitesse de MM. Lecouteux et Garnier : c'est une machine Corliss, qu'on a modifiée de façon à permettre les grandes vitesses en supprimant l'appareil à déclic[1] ; elle a été installée à la station municipale d'électricité des Halles centrales, où elle fait 170 chevaux par 180 révolutions à la minute. Le cylindre est à quatre tiroirs ; les deux tiroirs supérieurs d'admission sont actionnés par un double levier commandé par un excentrique, alors qu'un autre excentrique commande un second levier faisant osciller les tiroirs inférieurs de décharge ; ces deux excentriques sont indépendants. Le premier est à course variable sous l'action du

[1] Cette disposition se retrouve dans une machine Tandem de M. Lencauchez aux locomotives de la Compagnie d'Orléans.

régulateur. Pour tout le reste de ses organes, cette machine appartient au genre Corliss. Pour assurer sa parfaite régularité, MM. Lecouteux et Garnier emploient un *régulateur détendeur*, qui permet les plus grandes variations du travail résistant et assure néanmoins une parfaite constance de la vitesse ; la conservation du matériel électrique nécessite absolument cette régularité, car les à-coups ont des conséquences fatales pour les lampes à incandescence. Le régulateur-détendeur a pour office de conserver une différence de pression constante entre la boîte à vapeur et la conduite d'amenée ; il se compose d'un obturateur annulaire, monté sur un axe, et pouvant tourner sans frottement dans un autre anneau fixe ; il est sous la dépendance d'un régulateur Porter. Des orifices percés dans les obturateurs annulaires livrent passage à la vapeur, mais leur action est calculée de telle sorte qu'à la position de régime du régulateur il y ait une différence de pression réglable à volonté, et que, pour les positions extrêmes, les orifices soient complètement fermés ou ouverts. Un contre-poids auxiliaire glissant le long du levier de commande sert à régler la marche normale de l'appareil. Ce régulateur détendeur vient au secours du régulateur de la machine, et il maintient très bien la constance de régime désirée, alors même qu'on déchargerait subitement la machine de la totalité de son travail extérieur.

CHAPITRE X

MACHINES LOCOMOBILES, DEMI-FIXES ET SERVO-MOTEURS

Les machines fixes sont les moteurs de la grande industrie ; mais les travaux publics et l'agriculture demandent fréquemment le secours de la vapeur pour remplacer la main-d'œuvre de l'homme, qui devient de plus en plus rare et extrêmement coûteuse; du reste, il est toujours regrettable de demander à l'ouvrier intelligent la force qu'on peut obtenir si aisément par l'emploi des machines motrices. Il s'imposait donc de créer un moteur mobile, transportable en tous lieux, portant avec lui sa chaudière et sa pompe, sous le volume le plus restreint; ce moteur devait être simple, facile à gouverner, et assez puissant pour remplir la tâche d'une escouade de manœuvres. Nous venons de tracer le programme que les ingénieurs ont dû réaliser dès le début de la machine à vapeur.

Locomobiles. — Les locomobiles sont nées, croyons-nous, en Amérique, mais elles répondaient à un si pressant besoin, qu'elles se sont répandues partout avec une extrême rapidité ; c'est M. Calla[1] qui a été leur premier constructeur français ; de 1852 à 1867, il a fabriqué plus de 1100 locomobiles d'une force totale de plus de 10.000 chevaux, représentant une valeur de plus de sept millions de francs. En même temps les maisons Lotz, Gérard, Albaret et bien d'autres encore acquéraient une incontestable notoriété dans cettte industrie ;

[1] La maison Calla est dirigée aujourd'hui par MM. Chaligny et Guyot-Sionnest, qui ont conservé les traditions du passé.

les ateliers Cail, Flaud, Durenne, Chevalier, Thomas et Laurens se spécialisaient aussi dans la construction des loco-

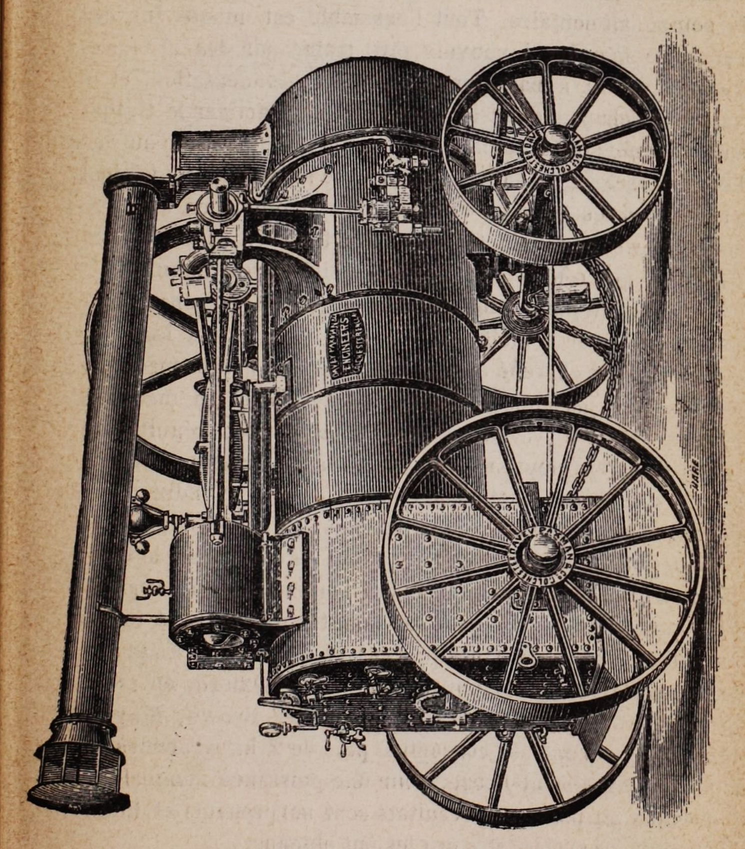


Fig. 70. — Locomobile Davey-Paxman.

mobiles et créaient des types excellents, qui pouvaient lutter avec les machines américaines de Ransomes et Sims, Clayton, Fox, Fowler, etc.

Leurs formes sont extrêmement variées, mais elles réalisent cependant un type unique : la chaudière est tubulaire, comme celle des locomotives, afin de pouvoir donner rapidement une grande masse de vapeur ; elle porte la machine et la pompe alimentaire. Tout l'ensemble est monté sur des roues, de manière à pouvoir être traîné par des chevaux. Le moteur est à haute pression et sans condensation, et la vapeur s'échappe dans la cheminée pour activer le tirage, sans toutefois qu'il devienne assez vif pour projeter au dehors des escarbilles enflammées, car ce serait un inconvénient grave dans les travaux de la ferme auxquels on applique souvent ces moteurs. On voit bien tous ces détails sur la figure 70 qui représente une locomobile Davey-Paxman.

On a obtenu par les locomobiles des résultats économiques inattendus, qui témoignent du soin avec lequel les constructeurs ont cherché à faire bénéficier ces petites machines de tous les perfectionnements réalisés dans les machines fixes : détentes variables Meyer ou Farcot, régulateurs isochrones, enveloppes de vapeur, haute pression, grande vitesse du piston, quelquefois même double cylindre Compound, rien n'a été omis pour diminuer la consommation du combustible. Peut-être même y a-t-il eu excès dans le bien, car on a paru oublier quelquefois que la simplicité des organes et la modicité du prix sont des qualités qui priment toutes les autres dans ce cas. Quoi qu'il en soit, nous tenons à signaler qu'au concours de l'Exposition agricole d'Oxford, en 1870, il s'est trouvé des locomobiles Clayton, Brown, May et Reading qui n'ont pas consommé plus de 2 kilogrammes de charbon par cheval-heure, pour une puissance nominale de 4 chevaux au plus ; ces résultats sont surprenants et tout à l'honneur des spécialistes qui les ont obtenus.

Machines demi-fixes. — La perfection de ces locomobiles a sans doute été la cause déterminante de la création de ce type de machines légères, moins mobiles. La chaudière a été enlevée de ses roues et fixée sur un châssis ; la machine est

restée boulonnée sur la chaudière, mais il a été possible de lui donner plus de ressemblance encore avec les grandes

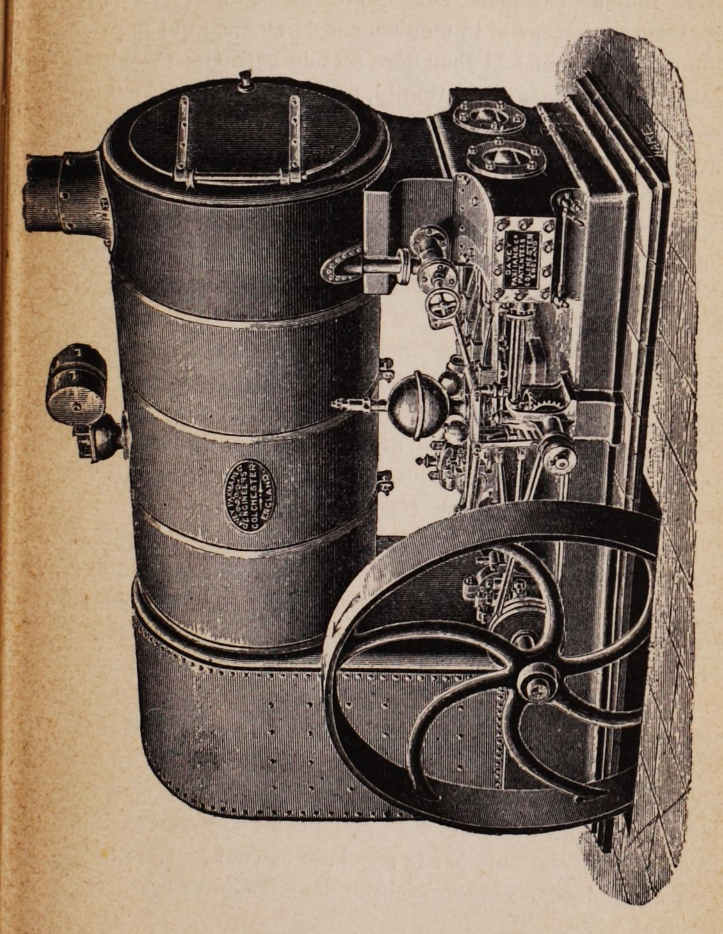


Fig. 71. — Machine demi-fixe Davey et Paxman.

machines fixes; bref, la demi-fixe est devenue le moteur de la petite industrie et l'on en a vu établir sur des planchers.

La figure 71 représente une demi-fixe de la maison Davey

et Paxman, qui a été employée fréquemment dans les stations d'électricité et qui a acquis une certaine vogue. Le mécanisme moteur est placé sous la chaudière, dans le but de supprimer entièrement le mouvement de tangage qui se produit toujours quand la chaudière sert de bâti. Ces machines devant marcher sans discontinuité, pendant de longues heures, les constructeurs ont veillé tout particulièrement à leur assurer une grande stabilité ; le bâti est en fer forgé, l'arbre en acier, les parties frottantes sont trempées en coquille, les paliers sont de grandes dimensions ; la détente est automatique, etc. ; bref, ce sont des moteurs pour lesquels on n'a rien négligé de ce qui peut assurer une marche bonne, régulière et économique.

Le plus souvent, les machines demi-fixes sont à chaudière verticale, le cylindre et la distribution étant disposés latéralement. C'est le type des machines Bréval, dont les dimensions étaient tellement réduites qu'une machine de 4 chevaux, exposée en 1867, ne pesait que 1750 kilogrammes et ne couvrait qu'un emplacement de 1 mètre carré 1/3.

Mais c'est la maison Hermann-Lachapelle qui a conquis le plus de notoriété dans ce genre de machines. Fondée en 1850, elle a été gouvernée par M. Hermann jusqu'en 1879, époque où il prit sa retraite et céda ces établissements prospères à M. Boulet, qui dirigeait les ateliers depuis plusieurs années.

Machines Boulet. — Le type le plus connu des machines Boulet est représenté par la figure 72. Elle est dite à socle bâti isolateur, parce que le moteur est attaché sur un bâti spécial. La force de ces machines varie de 1 à 4 chevaux lorsqu'elles sont à détente fixe, et de 6 à 20 chevaux quand la détente est variable par le régulateur. Tous leurs organes sont à la portée des mécaniciens et leur conduite est extrêmement facile.

Elles occupent un espace restreint ; on y peut brûler toute espèce de combustible et elles sont réellement économiques. Aussi leurs applications sont-elles devenues extrêmement

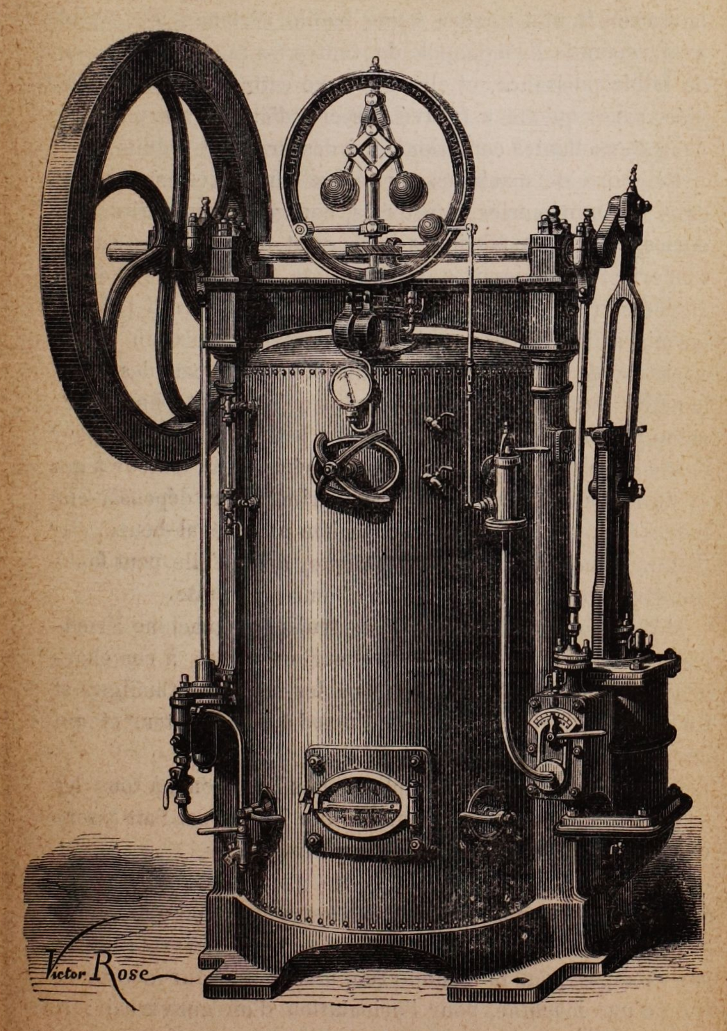


Fig. 72. — Machine Boulet.

considérables. Ce n'est, du reste, pas le seul type fourni par la maison Boulet : grâce à une habile réclame, elle semble avoir conquis le monopole de toutes les machines à vapeur de faible puissance, et elle conserve cette situation privilégiée, parce qu'elle a trouvé le secret d'établir ses machines dans d'excellentes conditions et à des prix fort réduits.

Ce genre de machines verticales demi-fixes est employé dans les imprimeries, papeteries, confiseries, sucreries, fonderies, brosseries, fabriques de chocolat, de boissons gazeuses, tanneries, blanchisseries, moulins, etc., et aussi pour l'éclairage électrique. Depuis que le décret du 30 avril 1880 [1] a permis d'établir ces machines librement, dans un atelier quelconque, même dans une maison occupée par des tiers, la petite industrie remplace le plus qu'elle peut l'homme de peine par un moteur domestique. La petite machine à vapeur domestique est le concurrent le plus sérieux du moteur à gaz et du moteur à vide ou à air comprimé; car, dépensât-elle même 3 ou 4 kilogrammes de charbon par cheval-heure, elle resterait encore la plus économique, dès qu'elle peut fonctionner un assez grand nombre d'heures de suite.

MM. Panhard et Levassor construisent la machine Friedrich, qui n'exige même pas de chauffeur, grâce à son chargeur automatique. Citons encore les machines Chaligny et les machines Rikkers, qui sont aussi à bâti isolateur et qui donnent de fort bons résultats.

La machine à vapeur se plie, nous le voyons, à tous les usages; il n'est donc pas étonnant que M. Farcot l'ait asservie complètement en créant son *servo-moteur*.

Servo-moteur. — C'est une petite machine de dimensions très réduites, dont on utilise le concours quand on a besoin de produire un effort considérable dans une direction rectiligne; par exemple, pour la manœuvre d'un levier, pour la mise en train d'une machine, pour l'orientation d'un gouvernail; il

[1] Voir à l'appendice le texte de ce décret.

faut alors nécessairement donner au mécanicien un coup de main énergique de manière à ce qu'il n'ait pas à développer un effort supérieur à ses forces et qu'il puisse agir rapidement et sûrement.

L'idée du servo-moteur est née dans la maison Farcot, et le premier brevet porte le nom de MM. Joseph Farcot et Duclos. Le but des inventeurs est clairement résumé dans l'énoncé suivant [1] : « Asservir tout moteur au gouvernement

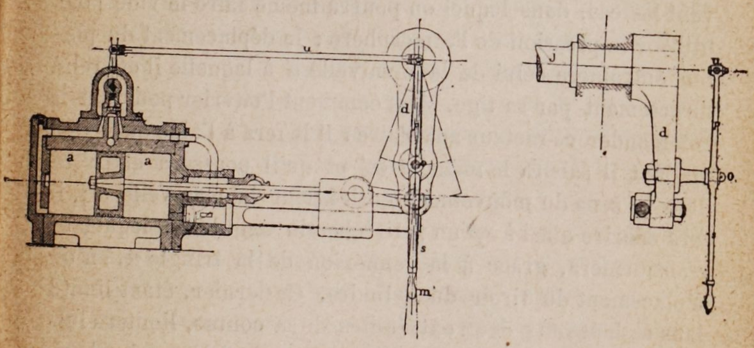


FIG. 73. — Servo-moteur Farcot.

absolu d'un conducteur en faisant cheminer directement ou par un intermédiaire quelconque, la main de celui-ci avec l'organe sur lequel agit le moteur, de telle sorte que tous deux marchent, s'arrêtent, reculent, reviennent ensemble, et que le moteur suive pas à pas le doigt indicateur du conducteur dont il imite servilement tous les gestes. »

Ce programme peut être réalisé de bien des façons, car le moteur *asservi* vient au secours du bras de l'homme dans les circonstances les plus diverses. Voici le type le plus

[1] Joseph Farcot, *Le Servo-moteur ou moteur asservi*, Paris, Baudry, 1873.

habituel par lequel on utilise la pression de la vapeur pour obtenir un mouvement angulaire alternatif. Il s'agit de déplacer la manivelle *d* pour faire tourner d'un angle déterminé l'arbre *j* (fig. 73); ce mouvement, que nous supposerons entravé par une résistance considérable, qu'un ouvrier ne saurait vaincre, doit pouvoir être effectué très aisément et arrêté quand on voudra. A cet effet, M. Farcot a eu l'idée d'asservir à ce travail un piston mobile dans le cylindre *a*, qu'on alimentera de vapeur, d'air ou d'eau comprimée, suivant les cas, dans lequel on pourra même faire le vide pour utiliser la pression de l'atmosphère : le déplacement du piston entraînera celui de la manivelle *d* à laquelle il est relié directement par sa tige. Mais comment l'ouvrier pourra-t-il commander ce moteur auxiliaire ? Il le fera à l'aide du levier *sp* dont il saisira le manche *m'* et qu'il poussera et tirera dans le sens du mouvement désiré pour la manivelle *d* ; il fera décrire ainsi à *sp* un petit chemin angulaire, lequel se transformera, grâce à la connexion de la tringle *u*, en un déplacement du tiroir du cylindre. Ce dernier, étant limité dans sa boîte aux deux extrémités de sa course, limitera lui-même l'oscillation du levier *sp* par rapport à la manivelle *d*. On comprend alors facilement ce qui se passe: dès que le tiroir, suivant le mouvement de *m'*, aura découvert les orifices d'admission ou d'échappement, le piston poussera ou tirera *d* tant que le conducteur suivra son mouvement. Si celui-ci s'arrête ou ralentit la translation de *m'*, le piston s'arrête lui-même ou ralentit sa course, car dès qu'il tend à marcher plus vite que la main qui le conduit, il fait tirer ou pousser *m's* en sens inverse du mouvement et il ferme le tiroir, la manivelle *d* transportant toujours avec elle le manche *m'* dont le centre d'oscillation est en *o*. Le piston, fermant ainsi son tiroir dès qu'il tend à marcher plus vite que son conducteur, ne pourra donc cheminer que selon les indications et la mesure permise par *m'* qui le tient en bride, dit M. Farcot, « comme la main d'un cavalier mar-

chant à terre conduit son cheval par le mors ». Dans ces conditions, l'asservissement est complet et l'ouvrier n'a qu'à surmonter un effort minime, correspondant à la résistance du tiroir et du système articulé qui le commande. Ce dispositif est employé pour la manœuvre de n'importe quel genre de levier ; il donne à la manœuvre une puissance, une précision et une rapidité d'action inespérées.

Le servo-moteur Farcot s'applique tout aussi bien aux rotations continues ; il a été utilisé pour la construction de petits appareils de levage destinés à saisir un fardeau et à le placer instantanément, avec précision, juste à l'endroit désigné. Mais ses qualités se manifestent surtout dans les appareils à gouverner les navires ; un seul homme peut dès lors transporter en quelques secondes la barre d'un bord à l'autre, manœuvre qui nécessite plusieurs minutes quand elle est faite à bras d'homme, avec la roue à manettes ordinaire. L'évolution du navire devient ainsi beaucoup plus rapide, et l'on est maître de contourner les passes les plus tortueuses et de virer avec une grande aisance : le servo-moteur a contribué beaucoup aux perfectionnements apportés depuis vingt ans à la conduite des navires de fort tonnage et notamment des puissants cuirassés. Le dispositif adopté est représenté par les figures 74 et 75 qui représentent le treuil sur lequel s'enroulent les drosses pour le gouvernail, et les cylindres inclinés qui impriment à son tambour le mouvement circulaire voulu.

L'arbre A porte le tambour *n* ; ce tambour peut se déplacer sur son axe de manière à venir s'embrayer avec la roue dentée *m* qu'actionne la machine par l'intermédiaire du pignon *l* ; quand on gouverne à bras il est, au contraire, solidarisé avec la poulie *o* à chaîne de Gall : cet embrayage est obtenu par le volant *q*. Pour que les drosses s'enroulent régulièrement sur le tambour, elles sont guidées par la poulie double *r*, montée sur un charriot et entraînée par la vis S ; cette vis reçoit son mouvement de rotation de l'arbre A par

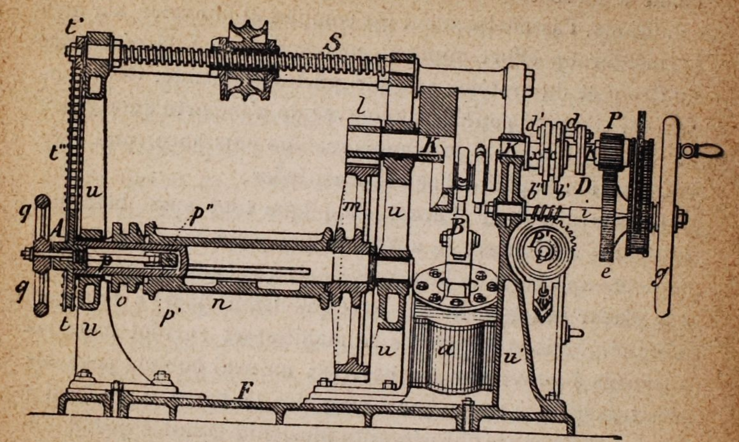


FIG. 74. — Treuil servo-moteur Farcot.

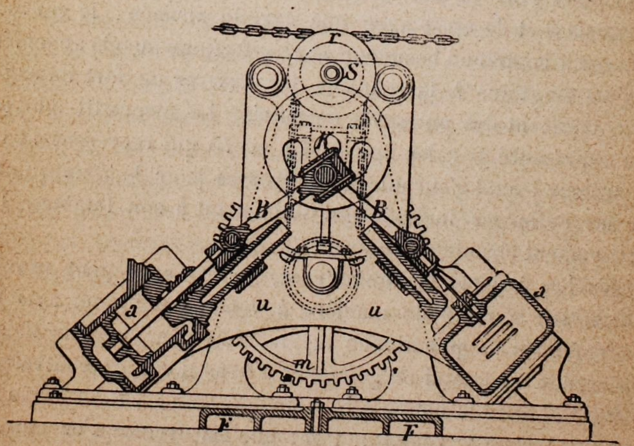


FIG. 75. — Coupe du treuil Farcot.

la chaîne *t''* et les deux roues *t* et *t'*. Les deux cylindres à vapeur inclinés *a* attaquent, par les bielles B, un même manneton de manivelle K; la vapeur leur est distribuée par des tiroirs à coquilles ordinaires, ayant des recouvrements de 3 millimètres à l'introduction et de 1 millimètre à l'évacuation : mais ce sont des cylindres asservis. L'excentrique a une excentricité de 21 millimètres; il est fou sur un tourillon venu de forge sur l'arbre K, mais excentré lui-même de 21 millimètres et formant avec la manivelle un angle de 180°. Supposons que ces deux excentricités soient dirigées en sens inverse et sur une même ligne; comme elles sont égales, elles se compensent et le rayon d'excentricité du système est nul; il équivaut alors à un simple disque et ne donne pas de mouvement aux tiroirs; la machine s'arrête donc. Or, le doigt du servo-moteur a précisément pour effet de donner au système une excentricité dans un sens ou dans l'autre et, par suite, de mettre la machine en marche en la faisant tourner dans le sens voulu pour la manœuvre. Le mode d'asservissement que nous venons de décrire est dit *à calage variable :* il a été adopté a bord de l'*Amiral-Duperré* et a fourni les meilleurs résultats.

Un autre treuil asservi a été employé pour la manœuvre du gouvernail du *Suffren*, mais l'asservissement a été basé sur le renversement des courants de vapeur, les trois tiroirs cylindriques distributeurs de la vapeur fonctionnant tantôt comme tiroirs à coquilles, tantôt comme tiroirs en D.

Enfin, MM. Farcot ont fort habilement adapté le servo-moteur aux mises en train des machines des cuirassés et à leur changement de marche : il suffit d'indiquer cette dernière application pour faire ressortir l'étendue et la variété des services que peut rendre la belle invention de M. Joseph Farcot.

CHAPITRE XI

MACHINES COMPACTES

L'industrie recherche quelquefois des machines extrêmement compactes et ramassées, pouvant développer un travail considérable, marchant à grande vitesse et assez régulièrement; dans ce cas, on se préoccupe peu de la consommation de vapeur, le service rendu payant largement une certaine augmentation dans la dépense de combustible.

Pour remplir le programme dont nous venons d'énumérer les conditions, on emploie généralement des machines à trois ou quatre cylindres, marchant à simple effet, ce qui présente l'avantage de soumettre les bielles et les articulations à des efforts toujours dirigés dans le même sens et permet de simplifier la construction et la forme des organes. De plus, la multiplicité des cylindres moteurs donne un couple plus constant sur l'arbre.

Machine Brotherhood. — Parmi les machines compactes dont l'emploi se généralise, nous signalerons celle de M. Brotherhood, qui a été, du reste, l'objet de nombreuses imitations et constitue, pour nous, un type que nous devons décrire.

Cette machine se compose de trois cylindres, disposés à 120° l'un de l'autre et formant un groupe rayonnant, comme l'indique la figure 76; les bielles sont rattachées à un bouton unique et elles sont articulées directement sur les pistons sans l'intermédiaire d'aucune tige. La distribution est opérée par un seul tiroir, de forme circulaire, calé sur l'arbre moteur et tournant avec lui; ce tiroir renferme deux chambres, dont l'une est en communication permanente avec la vapeur vive amenée par un conduit annulaire intérieur, et

l'autre avec un conduit annulaire extérieur d'échappement. La rotation du tiroir met les deux chambres successivement en relation avec les lumières de chacun des trois cylindres ; la lumière d'admission est percée contre le fond des cylindres et celle d'échappement est à l'autre extrémité de la course. Comme cette dernière débouche au bas du cylindre, au

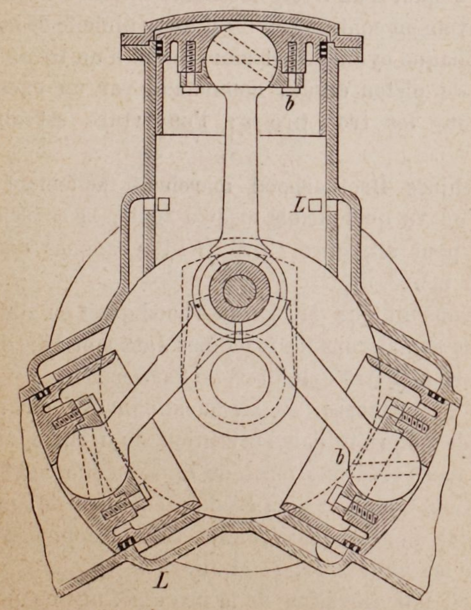


Fig. 76. — Machine Brotherhood, d'après Th. Schwartze.

commencement de la course en retour, les pistons sont percés d'une ouverture *b*, qui coïncide, pendant l'échappement, avec le canal de décharge par des conduits de retour L ; il n'y a donc pas de compression.

Comme les bielles travaillent toujours dans le même sens, on a pu remplacer les coussinets par de simples butées cylindriques embrassant le quart du tourillon.

L'admission est arrêtée au moment où le tiroir obture la lumière d'admission, et la vapeur subit une longue détente correspondant à un demi-tour de l'arbre moteur. La régularité de marche est assurée par un régulateur à force centrifuge, agissant sur une valve.

Pour les moteurs plus importants, M. Brotherhood est revenu à l'emploi d'un tiroir oscillant, en place du distributeur à mouvement continu, qu'il est assez difficile de maintenir étanche. Chaque cylindre est alors muni d'un tiroir spécial, en forme de piston creux, commandé par un excentrique conique pour les trois tiroirs ; l'ouverture est ainsi plus prompte.

Les machines Brotherhood marchent facilement à 1200 tours et l'on va quelquefois jusqu'à 2000 ; la consommation de vapeur peut atteindre 15 à 20 kilogrammes de vapeur par cheval-heure.

Nous avons dit que M. Brotherhood avait eu des imitateurs ; nous signalerons les machines James et Wardrope, et les machines à quatre cylindres, de Parsons.

Machine Westinghouse. — M. Westinghouse, qui a acquis une grande notoriété par l'invention du frein à air comprimé, a aussi créé une machine rapide à simple effet, dont la disposition, simple et bien étudiée, est digne de son auteur, et qui donne d'excellents résultats. Cette machine est représentée par les figures 77, 78 et 79.

On y voit une élévation de la machine, une coupe du cylindre et une section de profil du tiroir Westinghouse.

Cette machine est composée de deux cylindres verticaux A, ouverts à la partie inférieure, fonctionnant à simple effet et dont les pistons actionnent simultanément l'arbre moteur H. L'axe de cet arbre n'est point placé dans le prolongement de l'axe vertical des cylindres, mais il est excentré d'une quantité égale à la moitié du rayon des vilebrequins : l'obliquité de la bielle est ainsi moins grande pendant la course motrice que pendant l'échappement ; or, pendant cette der-

nière phase, la bielle ne travaille pas, puisque les cylindres sont à simple effet. De plus, l'excentricité de l'arbre moteur

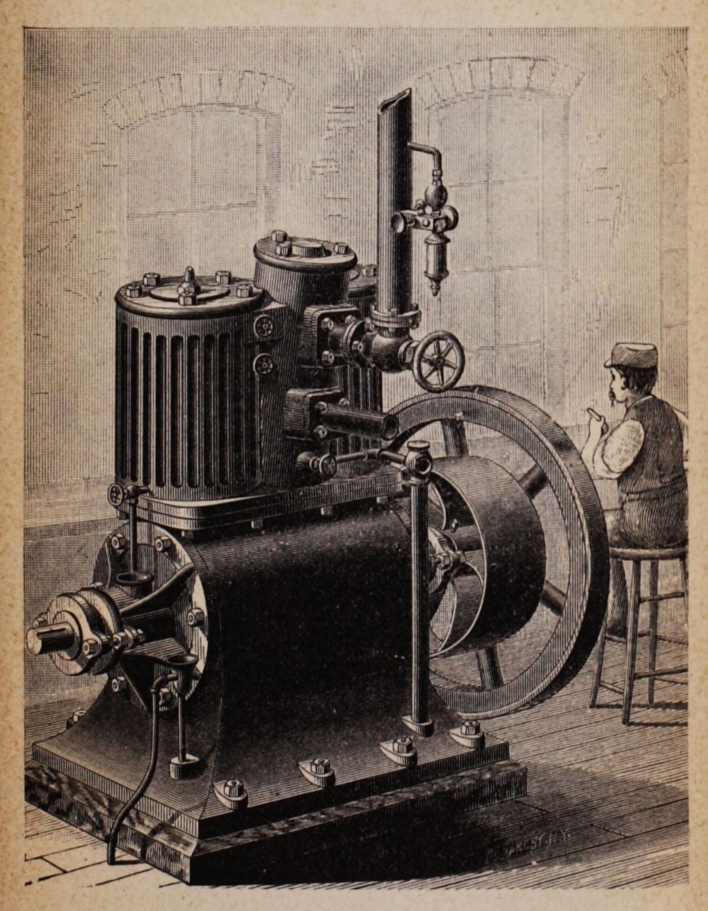


Fig. 77. — Machine Westinghouse.

supprime les points morts, bien que les deux coudes du vilebrequin soient à 180°.

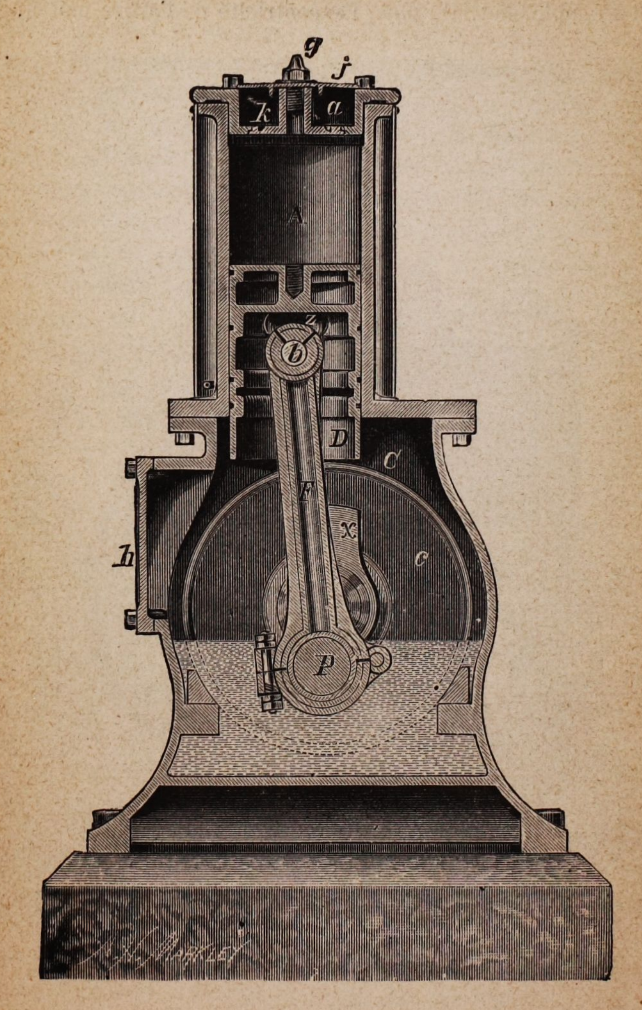


Fig. 78. — Coupe du cylindre Westinghouse.

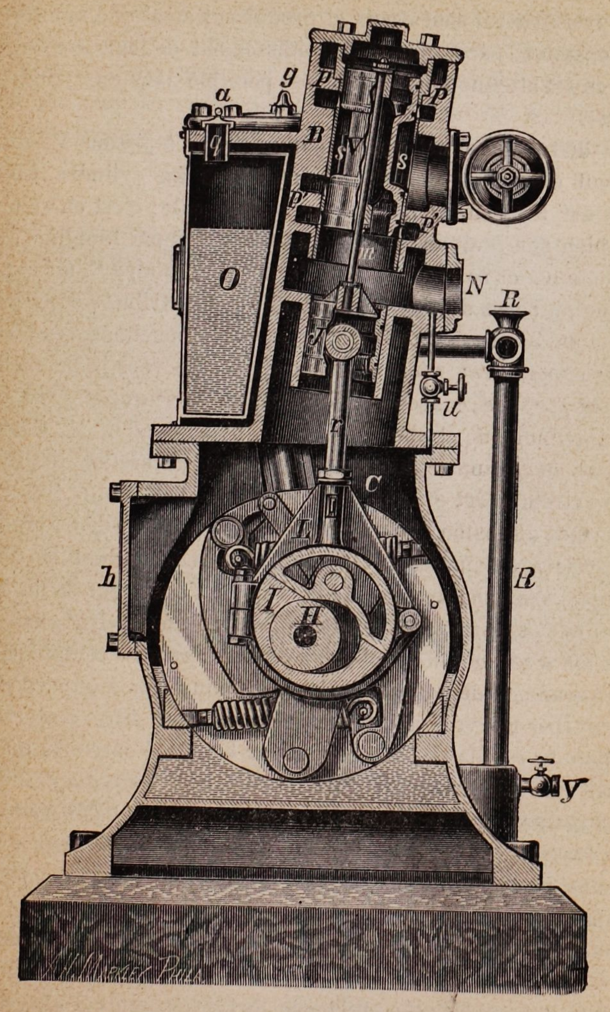


Fig. 79. — Section de profil du tiroir Westinghouse.

Les pistons sont longs, leur épaisseur dépassant le quart de leur course; il sont creux et produisent ainsi une moindre condensation, parce que le refroidissement de leurs surfaces actives est atténué autant qu'il est possible dans un cylindre ouvert.

La distribution est opérée par un tiroir à pistons V, qui se meut d'un mouvement alternatif dans un cylindre dont l'axe est légèrement incliné sur la verticale; c'est ce qu'on voit bien sur la figure 79. La vapeur arrive par le milieu de ce cylindre et se répand dans l'espace annulaire S ménagé autour du corps du tiroir; de là, elle est distribuée dans les cylindres A par les ouvertures *p*, qui débouchent vers les fonds supérieurs; l'échappement s'effectue vers la fin de la course par une couronne d'ouvertures pratiquées dans la paroi cylindrique et aboutissant par *p'* au conduit N. Cette disposition annulaire donne aux lumières une section de passage extrêmement grande, atteignant 8 et 13 pour 100 de la surface du piston. Les bords internes du tiroir découvrent les orifices d'admission; les bords externes règlent la décharge; une compression de la vapeur s'opère sur la fin de la course et ramène sa pression à la moitié environ de la pression d'admission, ainsi qu'on peut s'en rendre compte par le diagramme de la figure 80, dans lequel on a superposé les courbes relevées à diverses vitesses pour faire ressortir l'action du régulateur. Ce régulateur est placé entre les manivelles, et il actionne directement le tiroir; il se compose de deux masses, dont la force centrifuge est contre-balancée par des ressorts, et qui déplacent l'excentrique. Au fur et à mesure que la vitesse augmente, la longueur de l'admission diminue, comme l'indiquent les diagrammes A, B, C, D et F; en même temps que la détente devient plus forte, la compression s'accentue davantage. Il semblerait, de prime abord, qu'il puisse en résulter une perte de travail, mais il n'en est rien, car la consommation de vapeur est réduite du même coup. Le régulateur ne commence à fonctionner qu'au mo-

ment où la machine atteint sa vitesse nominale à un centième près, et il a accompli sa course et achevé son action avant que la machine n'ait dépassé d'un centième cette vitesse; l'écart ne peut donc point dépasser 2 pour 100, c'est-à-dire qu'une machine réglée à 300 tours fera de 297 à 303 révolutions, cette dernière vitesse correspondant à la marche à vide.



Fig. 80. — Diagramme Westinghouse.

Sans préconiser les vitesses vertigineuses, M. Westinghouse cherche néanmoins à atteindre les plus vives allures compatibles avec un bon fonctionnement et un entretien facile : un moteur de 5 chevaux fait 500 tours, une machine de 200 chevaux est réglée à 250 tours. Pour cela, il a fallu chercher à réaliser parfaitement l'équilibre des pièces à mouvement réciproque, l'équilibre des organes rotatifs, la constance dans la direction des efforts, la légèreté de toutes leurs parties, une lubréfaction assurée, etc. ; les détails du moteur ont été étudiés avec le plus grand soin en vue de ces

divers résultats. Signalons notamment la construction des coussinets, qui sont formés d'une garniture en un métal fusible appelé Babbith, qui est logé et refoulé en place à la presse sous des pressions de 2600 kilogrammes par centimètre carré.

Le bâti présente une disposition curieuse : il est creux et renferme un bain d'eau surmonté d'une couche d'huile, dans laquelle les pièces en mouvement viennent tremper à chaque tour. L'huile qui tendrait à s'échapper le long de l'arbre est recueillie par une roue à palettes qui la ramène dans le bâti.

Pour obvier aux désastreux effets d'une rupture par choc, le constructeur a fait du fond du cylindre *sa pièce cassante :* ce fond est constitué par une plaque, ajustée contre un épaulement, qui se brisera sous un effort de 13 kilogrammes par centimètre carré, mais dont les fragments ne pourront retomber dans le cylindre. Une rupture survenant, il est très aisé de remettre une nouvelle plaque et ce travail ne demande que quelques minutes.

Voici un détail particulièrement intéressant et qui caractérise la *manière* américaine : toutes les pièces de ces machines sont faites sur gabarits avec une telle exactitude, qu'on est assuré de pouvoir les remplacer instantanément par des pièces de rechange, qui ne nécessiteront pas un coup de lime et pourront être montées sans aucun ajustage. On peut donc acheter avec la machine, une bielle, des goujons, une bague d'excentrique, des segments de piston et de tiroir, etc., qui donneront toute sécurité.

Il existe sur le continent un grand nombre de machines Westinghouse qui marchent depuis plusieurs années d'une manière très satisfaisante; elles ont été appliquées par milliers en Amérique aux usages les plus divers, avec une consommation de combustible relativement faible, c'est-à-dire en ne dépensant que 2 à 3 kilogrammes de charbon par cheval-heure; le graissage lui-même n'est point coûteux

malgré l'extrême rapidité de marche de ces moteurs. On nous a cité le fait suivant, qui est remarquable : une machine de 7 chevaux, faisant 700 révolutions, fonctionna cinq mois sans abri, exposée aux embruns de la mer ; elle se revêtit d'une couche épaisse de sel et marcha néanmoins nuit et jour, avec seulement trois arrêts de quinze minutes chacun.

La nécessité de réduire encore le prix du cheval-heure a amené M. Westinghouse, à construire des machines *Compound* à condensation. Dans ces nouveaux moteurs, nous retrouverons les dispositions d'ensemble décrites ci-dessus; mais le mécanisme, loin d'avoir été compliqué, est au contraire devenu plus simple. Les surfaces des deux cylindres sont entre elles comme 1 est à 3,5; la vapeur est admise par une tubulure supérieure pourvue d'un robinet de mise en train, et elle s'échappe par une autre tubulure voisine de la première. Les pistons agissent encore à simple effet; pour éviter qu'en vertu de la vitesse acquise le piston du grand cylindre ne vienne buter contre les fonds, on a disposé contre le bâti une sorte de *dahspot*, dans lequel il se fait un vide partiel à la montée du piston; ce vide maintient la bielle en contact avec l'arbre coudé. La pression de vapeur est d'au moins 8,5 à 10 kilogrammes. Dans ces conditions, la consommation de vapeur est réellement réduite le plus possible, ainsi qu'il ressort d'expériences faites à Pitsburg, sur une machine dont les cylindres avaient 356 et 610 millimètres de diamètre et une course commune de 356 millimètres.

CONSOMMATION DE VAPEUR PAR CHEVAL-HEURE EFFECTIF
MARCHE A CONDENSATION

PUISSANCE EN CHEVAUX	CONSOMMATION	
	Pour 80 kilogr. de pression	Pour 7 kilogr. de pression
200	8,09	10,02
160	8,55	9,07
130	8,54	8,87
100	8,68	8,81
70	9,00	9,07
40	10,38	10,05

Sans condensation, la consommation a augmenté notablement.

200 chevaux	10,86	»
40	18,10	17,82

Il est à remarquer que, dans ces machines Compound, la boîte du tiroir constitue le seul réservoir intermédiaire entre les deux cylindres ; il n'y a pas d'enveloppe de vapeur. Les chiffres cités ci-dessus, sur l'autorité de M. Barrus, sont d'autant plus remarquables.

CHAPITRE XII

MACHINES ROTATIVES ET TURBO-MOTEURS

Machines rotatives de Watt, Behrens et Pecqueur. — Trouver un dispositif permettant d'utiliser la pression de la vapeur pour produire directement et sans intermédiaire un mouvement circulaire continu, voilà un rêve qui a été caressé par de nombreux inventeurs ; l'illustre Watt, lui-même, a payé son tribut à l'illusion que produit dans les meilleurs esprits la passion de simplifier des mécanismes en supprimant tous les organes qui paraissent inutiles. Hâtons-nous de dire que ce grand génie a bien vite reconnu son erreur et qu'il n'a eu garde d'y persévérer. C'est, en effet, une erreur de croire que le mouvement rectiligne alternatif du piston entraîne une perte de travail par le changement de sens de son mouvement : il n'y a, en réalité, aucun travail perdu, parce que la vitesse du piston passe par une valeur zéro au moment même où le mouvement s'intervertit. Le principe dont partaient les mécaniciens incompétents qui cherchaient à perfectionner la machine à vapeur étant erroné, il n'y a pas lieu de s'étonner de leur insuccès : de fait, ils ont dépensé inutilement leur génie inventif en s'opiniâtrant dans

leurs tentatives et aucune machine rotative n'est devenue pratique.

Watt avait ouvert la voie en faisant tourner un piston rectangulaire autour de l'axe même du cylindre : la vapeur pressait sur une de ses faces, tandis que l'autre face communiquait avec le condenseur. Il enfermait donc la vapeur dans une cavité indéfiniment extensible, alimentée par un conduit implanté normalement sur la paroi du cylindre ; un autre conduit disposé de même réunissait le cylindre au condenseur. Mais au moment où le piston traversait l'intervalle séparant ces deux conduits, il fallait nécessairement que l'orifice d'amenée de la vapeur vive fût obturé, sinon la vapeur aurait passé directement au condenseur ; ce résultat était obtenu par le mouvement d'une sorte de disque, s'appliquant sur cet orifice et rentrant dans une cavité qui permettait au piston de passer sans toucher le disque. Watt constata bientôt qu'un piston tournant et un disque oscillant ne pouvaient être étanches ; le problème présentait de telles difficultés qu'il renonça à les surmonter. Du reste, une machine disposée d'après ce plan ne saurait rester en bon état, alors même qu'un ajustage parfait des organes aurait été obtenu par le constructeur, car l'usure d'un rayon tournant est proportionnel aux chemins parcourus et une garniture ne tarderait pas à donner lieu à des fuites le long de la circonférence extérieure des pistons.

Cochrane et Hick adoptèrent une combinaison d'excentriques circulaires et de rayons rentrants, formant joint sur la paroi du cylindre : mais ces palettes glissaient dans des rainures et ce dispositif était encore moins viable que celui de Watt.

Si des machines rotatives pouvaient réussir, le succès aurait couronné les efforts de Behrens, qui adopta un dispositif de roues dentées engrenant ensemble et formant joint par les lignes de contact de leur denture. Ce genre de machines a réussi à Fabry pour les ventilateurs et à Greindl pour l'épuisement des eaux ; il procura à Behrens un succès

relatif qu'il serait injuste de méconnaître. Seulement, cet ingénieur mécanicien fut conduit à réduire le plus possible le nombre des dents de ses roues et, en fin de compte, il ne conserva qu'une seule dent. Deux roues cylindriques furent adossées l'une contre l'autre avec pénétration réciproque de leurs circonférences; chacune d'elles portait une dent embrassant 180° et placée de telle sorte que la dent d'une roue pénétrât dans le creux de l'autre : il n'y avait donc plus qu'une seule ligne de contact parallèle à l'axe de rotation. En marchant à grande vitesse, le résultat était acceptable, alors qu'on était résigné d'avance à sacrifier l'économie du combustible à la légèreté, à la simplicité et au bon marché du moteur.

Signalons encore dans ce rapide exposé la machine Pecqueur, qui a trouvé quelques applications dans les petits ateliers, et la machine à disque, dont les constructeurs anglais espéraient tirer quelque avantage vers 1845, mais qui est depuis longtemps abandonnée. Nous renonçons à les décrire par le détail, parce qu'elles sont compliquées et nécessiteraient des dessins à grande échelle : mais nous avons cru devoir les mentionner pour faire ressortir l'importance qu'on attachait autrefois à ces tentatives audacieuses. Le problème intéressant de la construction des machines à grande vitesse devait être résolu d'une autre manière, par un retour pur et simple à l'éolypile de Héron d'Alexandrie, en utilisant la force vide d'un jet de vapeur ou sa réaction. On réalise de la sorte un second genre de machines rotatives qui a donné, contre toute espérance, des résultats industriels.

Turbo-moteurs de Girard et Parsons. — Cette catégorie de moteurs a pour objet d'utiliser la force vive de la vapeur; elle correspond aux turbines hydrauliques et cette analogie a fait donner à ce genre de machines le nom de *turbines à vapeur* et de *turbo-moteurs*.

Quand la vapeur sous pression s'écoule dans l'air par un orifice de petite section, elle prend des vitesses considérables dont nous avons donné les valeurs à la page 31; la fai-

blesse de la masse du fluide qui s'écoule est compensée par sa vitesse et il en résulte une force vive appréciable par l'élévation au carré de cette vitesse. Pour recueillir cette force vive, il faut diriger le jet de vapeur sur une turbine animée d'un mouvement de rotation excessivement rapide, comparable à celui de la vapeur elle-même, sinon il se produirait des remous qui abaisseraient singulièrement le rendement : voilà où gît la difficulté. D'autre part, il importe d'amortir le plus qu'on peut la vitesse du jet pour utiliser complètement sa force vive; on y parvient en plaçant à la suite les unes des autres plusieurs turbines, de manière à constituer une véritable cascade, mais il résulte de cette multiplicité d'organes une complication fâcheuse. Enfin, de semblables appareils exigent une perfection de construction remarquable.

Mais on sait que les inventeurs se plaisent aux solutions que le vulgaire estime impossibles; aussi les turbines à vapeur ont-elles donné lieu à d'intéressantes recherches.

Parmi les insuccès du passé, signalons la *roue-hélice* de Girard, que Foucault a décrite avec éloge, en déclarant qu'une turbine de 50 centimètres de diamètre, alimentée de vapeur à 5 kilogrammes de pression, pourrait développer une puissance de 200 chevaux, à raison de 100 tours à la seconde. Cette vitesse vertigineuse n'effrayait pas ces deux habiles inventeurs; mais une telle machine ne serait-elle pas mieux à sa place dans un cabinet de physique que dans un atelier? Nous le croyons. Quoi qu'il en soit, la roue de Girard ne nous est connue que par le mémoire de Foucault.

Le développement de l'électricité ayant remis à l'ordre du jour le problème des moteurs à grande vitesse pour la commande directe des dynamos, les ingénieurs ont reporté à nouveau leur attention sur les machines turbines; la question avait mûri dans les esprits et les échecs du passé avaient fourni des données dont on a su profiter. En effet, on a vu paraître, en 1885, une nouvelle machine, celle de M. Parsons;

elle ne fut prise, d'abord, que pour une curiosité mécanique, mais elle est bientôt devenue un appareil industriel. La première turbine construite par l'inventeur tournait à une vitesse de 300 tours par seconde, soit de 18.000 tours à la minute, et elle développait 6 chevaux. Cette petite machine a travaillé presque sans interruption depuis lors et elle a été appliquée a une commande de dynamos. Le second moteur, exécuté peu après, ne faisait plus que 10.000 révolutions; il a encore été utilisé pour un service électrique, à bord de l'*Earl Percy*, de la Compagnie de navigation de la Tyne.

Puis on a fait des turbo-moteurs alimentant 250 lampes et plus, et il en a été installé un grand nombre, qui ont rendu d'excellents services. Leur consommation est celle d'une bonne machine à haute pression; mais la régularité de leur marche est telle que l'on réalise une sérieuse économie sur les appareils électriques, qui sont soumis à de moins nombreux accidents.

Le turbo-moteur Parsons est une véritable turbine Jonval; pour que la vapeur y pénètre sans choc et en sorte sans vitesse, on dispose, à la suite les unes des autres, un certain nombre de ces turbines et on réalise le turbo-moteur *compound*, tel que le construit aujourd'hui la Société des constructions mécaniques de Pantin (MM. Weyher et Richemond, administrateurs). C'est cette machine que nous allons décrire.

Turbo-moteur Parsons compound. — Sur un axe horizontal sont fixés, par exemple, 100 disques découpés comme une roue turbine, et portant des ailettes inclinées d'un certain angle; ces disques sont séparés l'un de l'autre par un intervalle égal à leur épaisseur. Cet axe, ainsi garni de disques, occupe le centre d'un long cylindre, lequel porte une série de couronnes qui viennent s'engager entre les disques; ces couronnes présentent aussi des ailettes dont l'obliquité est égale, mais opposée à celle des disques.

La machine se compose donc d'une série de disques mobiles, fixés sur un axe de rotation, et d'autant de couronnes

d'ailettes, solidaires de la paroi du cylindre et par conséquent immobiles.

Or, la vapeur entre dans le cylindre par son milieu; elle se partage en deux courants qui auront à traverser chacun 50 disques turbines échelonnés sur la droite et sur la gauche. Elle agit avec toute sa puissance vive sur le premier disque, dont les ailettes ont 45° d'inclinaison, et elle le fait tourner; puis elle se détend sur le second disque, dont l'inclinaison est un peu moindre; cette diminution d'obliquité a pour effet d'augmenter la surface active des ailettes et de faire croître le volume de la vapeur; cet accroissement est calculé de façon que la vitesse de la vapeur soit toujours celle qui convient le mieux à la turbine traversée. Le cinquantième disque reçoit la dernière action de la vapeur; en ce point, sa vitesse est faible et sa pression est à peu près égale à celle de la vapeur d'une machine à haute pression et grande vitesse.

Ce dispositif ingénieux mérite bien le nom de *Compound*, puisque la vapeur se détend depuis son entrée jusqu'à l'échappement, en passant de turbine en turbine, à travers des canaux de section croissante, constituant autant de cascades.

La répartition des disques en deux groupes, disposés symétriquement par rapport au centre, et présentant des obliquités opposées, a pour heureux effet d'annuler complètement les effets de la poussée longitudinale suivant l'axe.

La grande vitesse de rotation de cette machine a nécessité l'emploi de coussinets spéciaux, graissés par un procédé énergique et sûr. L'huile est aspirée par l'action d'un ventilateur jusqu'au niveau de l'axe de rotation, et, de là, elle passe tout le long des surfaces flottantes, par une circulation continue qui la ramène à son point de départ. Le même ventilateur sert aussi à la régularisation de la vitesse; le régulateur employé est magnétique, mais il agit sur l'admission de vapeur par l'intermédiaire du ventilateur, de la manière suivante. Une aiguille de fer est placée entre les noyaux inducteurs; la force magnétique tend à lui imposer une

position; un ressort antagoniste a pour objet de lui en faire prendre une autre; pour une vitesse déterminée de la dynamo, il y une position d'équilibre de cette aiguille. A ce moment, un prolongement cylindrique de l'aiguille obture plus ou moins la prise d'air du ventilateur; le vide par cet appareil dans la chambre d'appel est donc plus ou moins complet; il en résulte une flexion plus ou moins grande d'un diaphragme flexible, auquel est attaché le robinet d'admission de la vapeur. Ainsi la turbine à vapeur actionne la dynamo, excite les électros, fait mouvoir l'aiguille qui commande le ventilateur, celui-ci commandant enfin la valve d'admission de vapeur ; c'est fort compliqué, mais cela fonctionne très bien, car on n'observe pas de variation supérieure à 1 pour 100 au voltmètre.

Le rendement des turbo-moteurs est moindre que celui des machines à piston, mais quand il s'agit d'actionner des machines électriques, la consommation de charbon n'est point le facteur le plus important, et l'on attache plus de prix à la régularité d'allure, à la sécurité de marche et au peu d'encombrement de la machine. Malgré leur grande vitesse, ces turbines ne donnent lieu à aucun accident et elles consomment peu d'huile, ce qui se comprend, puisque c'est la même huile qui circule toujours dans les paliers; après trois années de fonctionnement, on a constaté une faible usure des coussinets. L'avantage résultant de l'accouplement direct et du petit volume a été très apprécié par les électriciens. Le poids de la machine est aussi très réduit, puisqu'elle ne pèse pas 40 kilogrammes par cheval effectif. Ces considérations expliquent la vogue du turbo-moteur Parsons; la puissance des machines construites à ce jour dépasse 3000 chevaux.

APPENDICE

I

STATISTIQUE DES APPAREILS A VAPEUR EN FRANCE ET EN ALGÉRIE POUR L'ANNÉE 1889 [1]

Usines à vapeur.

Nombre des appareils en activité en France et en Algérie. — Les divers renseignements statistiques concernant l'emploi de la vapeur dans l'industrie, en 1889, se résument comme il suit :

	France	Algérie
Nombre des établissements.	45,467	643
— machines.	56,865	703
Force en chevaux-vapeur des machines . . .	818,390	6,930
Nombre des chaudières (motrices et calorifères).	68,747	784
— récipients de vapeur [2].	24,854	81

En ce qui touche la France, tous ces nombres sont supérieurs à ceux qui avaient été relevés en 1888. Toutefois, quant aux établissements et aux chaudières, les augmentations d'une année à l'autre sont un peu au-dessous de celles qui avaient été signalées l'année précédente; pour la force en chevaux, elles sont au contraire au-dessus.

[1] Extrait de la *Statistique des appareils à vapeur*, publiée par le ministère des travaux publics. Paris, imprimerie Nationale, 1891, in-4.

[2] Cette statistique ne comprend pas les récipients qui ne sont pas dans le cas d'être déclarés, en vertu du décret du 30 avril 1880, c'est-à-dire les récipients qui ne sont pas susceptibles de contenir de la vapeur empruntée à un générateur distinct, sous une pression nettement appréciable, et ceux dont le volume est inférieur à 100 litres.

	AUGMENTATION EN 1889		AUGMENTATION EN 1888	
	Absolue	Pour 100	Absolue	Pour 100
Etablissements.	850	1.9	906	2.1
Machines.	1,430	2.6	1,401	2.6
Chevaux-vapeur.	43,679	5.6	26,255	3.5
Chaudières (motrices et calorifèr).	1,472	2.2	1,602	2.4
Récipients.	645	2.7	403	1.7

La différence tient d'une part à ce que le nombre des établissements et des chaudières restés en chômage a été plus élevé en 1889 que l'année précédente, et, d'autre part, à ce que des machines d'une puissance relativement considérable ont été installées dans le Nord, le Pas-de-Calais, la Seine, le Rhône, etc.

En définitive, le nombre et la force des appareils n'ont pas cessé de s'accroître depuis dix ans dans une remarquable régularité. Les chaudières à foyer intérieur tubulaire, qui ne formaient en 1879 que 28 pour 100 du total, étaient arrivées en 1888 à compter dans la proportion de 39 pour 100, s'augmentant de 11 pour 100 au détriment des chaudières à foyer extérieur qui n'atteignaient plus que 42 pour 100 de l'ensemble en 1888, au lieu de 53 en 1879.

De même, en considérant les chaudières au point de vue de leur installation, on a pu remarquer dans une précédente statistique dressée par la Division des mines, que le nombre des chaudières fixes avait décru, dans cet intervalle de dix années, de 10 pour 100, tandis que les nombres des chaudières mi-fixes et locomobiles s'étaient augmentés respectivement de 2 et de 8 pour 100.

Le mouvement a continué en 1889, en ce qui concerne le classement par type, et le nombre des chaudières à foyer extérieur s'est encore abaissé de 1 pour 100, tandis que celui des chaudières à foyer intérieur tubulaire s'est accru dans cette même proportion. D'après le mode d'installation, les variations proportionnelles ont été insensibles.

La force moyenne des moteurs desservis par des chaudières fixes a passé de 12,7 chevaux en 1879 à 22,2 chevaux en 1889, et celle des machines mi fixes de 5,9 chevaux à 7,4 chevaux.

RÉPARTITION DES APPAREILS A VAPEUR ENTRE LES DIVERS BRANCHES DE L'INDUSTRIE

BRANCHES D'INDUSTRIE	NOMBRE d'établissements	MACHINES		CHAUDIÈRES		RÉCIPIENTS de vapeur
		Nombre	Force en chevaux	motrices	calorifères	
Tissus et vêtements. . . .	6.084	6.595	163.580	8.410	2.002	10.671
Usines métallurgiques.. . .	4.694	7.450	160.056	8.308	45	140
Mines et carrières.	2.923	4.648	125.535	5.982	65	119
Industries alimentaires. . .	7.658	9.353	103.286	9.937	1.819	7.660
Agriculture.	12.216	14.597	84.029	14.643	57	80
Bâtiments, entreprises de travaux et diverses.	5.285	6.130	82.002	6.498	514	1.142
Industries chimiques et tanneries.	2.896	3.417	41.224	3.956	1.011	1.621
Papeteries, objets mobiliers et d'habitation, instruments. .	3.379	3.703	35.893	3.950	331	3.112
Services publics de l'État. .	332	972	22.785	1.113	106	309
TOTAL POUR LA FRANCE.	45.467	56.865	818.390	62.797	5.950	24.854
				68.747		
TOTAL POUR L'ALGÉRIE.	643	703	6.930	739	45	81
				784		

Depuis 1885, l'industrie des tissus et des vêtements occupe le premier rang dans la nomenclature qui précède; elle est suivie de près par celle des métaux. Chacune d'elles dispose à peu près du cinquième de la force motrice de l'ensemble des machines en activité. Puis viennent, par ordre d'importance, l'industrie minière et ses annexes (15 p. 100) et l'industrie alimentaire (13 p. 100). Ces quatre groupes occupent plus des deux tiers de la force totale des machines.

Si l'on considère le nombre des chaudières, le classement change. Le premier rang appartient alors à l'agriculture, qui n'emploie pas moins de 23 pour 100 de l'effectif total. Les industries alimentaires,

qui comprennent les sucreries, les minoteries, les distilleries, etc., l'industrie des tissus et vêtements, enfin les usines métallurgiques forment les trois groupes dans lesquels on compte, après l'agriculture, le plus grand nombre de chaudières.

En France, l'emploi de la vapeur s'est développé dans toutes les branches de l'industrie pendant l'année 1889, ainsi que le montre le résumé ci-dessous :

BRANCHES D'INDUSTRIE	AUGMENTATION EN 1889				
	des ÉTABLISSEMENTS	des MACHINES	de LA FORCE	des CHAUDIÈRES	des RÉCIPIENTS
			Chev. vap.		
Tissus et vêtements.	33	33	6.893	61	224
Usines métallurgiques..	52	129	4.923	82	12
Mines et carrières.	25	161	8.763	92	15
Industries alimentaires.	178	193	3.504	253	144
Agriculture.	336	465	3.514	490	16
Bâtiments, entreprises de travaux et diverses.	166	301	9.312	315	7
Industries chimiques et tanneries. .	29	50	1.563	94	126
Papeteries, objets mobiliers et d'habitation, instruments.	3	20	1.003	8	73
Services publics de l'Etat.	28	78	4.201	77	28
TOTAUX.	850	1.430	43.679	1.472	645

— En Algérie, le nombre des chaudières et celui des machines, ainsi que la force de celles-ci, ont légèrement diminué, par suite de la suppression d'un certain nombre d'appareils agricoles.

ACCROISSEMENT EN FRANCE DES USINES A VAPEUR DANS LES DIFFÉRENTES BRANCHES D'INDUSTRIE

BRANCHES D'INDUSTRIE	ACCROISSEMENT DANS CHAQUE BRANCHE DE 1880 A 1889		
	DU NOMBRE des établissements	DU NOMBRE des chaudières	DU NOMBRE des chevaux-vapeur
Tissus et vêtements. . .	409 soit 7 %	1.115 soit 12 %	45.442 soit 38 %
Usines métallurgiques. .	879 — 23	1.130 — 16	50.675 — 46
Mines et carrières.. . .	598 — 26	1.024 — 20	38.415 — 44
Industries alimentaires. .	1.440 — 23	1.858 — 19	19.426 — 23
Agriculture.	5.553 — 83	7.092 — 93	45.967 —121
Bâtiments, entreprises de travaux et diverses. .	1.553 — 42	2.374 — 51	40.114 — 96
Industries chimiques et tanneries.	348 — 14	880 — 22	13.891 — 51
Papeteries, objets mobiliers et d'habitation, instruments.	505 — 18	714 — 20	11.621 — 48
Services publics de l'État.	119 — 56	311 — 34	8.687 — 62
TOTAUX ET MOYENNES. .	11.404 soit 36 %	6.498 soit 32 %	274.238 soit 50 %

On voit combien l'emploi de la vapeur a fait de progrès dans certaines branches d'industrie depuis dix ans. Le nombre des établissements agricoles se servant de la vapeur, pour le battage des blés, le labourage, etc., a presque doublé ; celui des entreprises de bâtiment a augmenté de près de moitié ; les exploitations de mines et carrières, les usines métallurgiques et les industries alimentaires ont crû d'un quart. C'est dans la branche des tissus de vêtements que l'augmentation a été la plus plus faible ; elle n'a pas dépassé 7 pour 100 en ce qui concerne le nombre des établissements.

Au point de vue de l'augmentation de la force motrice, les exploitations agricoles tiennent encore la tête, avec 121 pour 100 d'augmentation ; les entreprises de bâtiments sont au second rang avec 96 pour 100 d'augmentation : enfin, les autres industries, sauf celle des aliments qui s'est développée de 23 pour 100 seulement, ont accru leur force motrice de moitié environ.

Le tableau suivant indique la part que prend chacune des branches d'industrie susmentionnées dans l'augmentation totale signalée depuis dix ans, tant pour le nombre des établissements et des chaudières que pour la puissance des moteurs.

BRANCHES D'INDUSTRIE	PART CONTRIBUTIVE DES DIFFÉRENTES BRANCHES D'INDUSTRIE dans les accroissements réalisés de 1880 à 1889		
	Nombre des établissements	Nombre des chaudières	Force des moteurs
Tissus et vêtements.	3	7	17
Usines métallurgiques	8	7	18
Mines et carrières.	6	6	14
Industries alimentaires.	12	11	7
Agriculture.	49	43	17
Bâtiment, entreprises de trav. et diverses.	14	14	15
Industries chimiques et tanneries.	3	6	5
Papeteries, objets mobil. et d'habitation.	4	4	4
Services publics.	1	2	3
ENSEMBLE.	100	100	100

Comme on le voit, la part proportionnelle prise par chacune des branches d'industrie dans l'augmentation totale est tout à fait différente, suivant que l'on s'occupe du nombre des chaudières ou de la force des moteurs.

En effet, c'est à l'agriculture qu'est due la plus large part de l'augmentation des appareils, tandis que cette branche d'industrie ne vient qu'en second lieu si l'on considère l'augmentation de la force motrice. La première place appartient alors aux usines métallurgiques, et l'agriculture est elle-même suivie de très près par l'industrie des tissus et vêtements et par celle du bâtiment.

Distribution des appareils à vapeur et de la force motrice par département. — Cette répartition offre peu de variations d'une année à l'autre. On comptait, en 1889, comme l'année précédente, 17 départements renfermant chacun plus de 1000 chaudières en

activité. Parmi les plus importants sous ce rapport, il faut citer le département du Nord, qui possédait 7714 chaudières réparties dans 3771 établissements; la Seine, qui avait en activité 7265 chaudières dans 4900 établissements.

A leur suite, mais bien loin en arrière, se classent par ordre d'importance, les départements suivants : Rhône, Pas-de-Calais, Loire, Bouches-du-Rhône, Seine-Inférieure, Seine-et-Oise, Saône-et-Loire, Somme, Gard, Oise, Aisne, Isère, Seine-et-Marne, Gironde, Loire-Inférieure. Tous ces départements possèdent plus de 1000 chaudières en activité ; ils sont suivis de très près par les Ardennes, Meurthe-et-Moselle, la Marne, l'Hérault.

Au point de vue de la force motrice utilisable, le département du Nord est de beaucoup le plus important; il n'occupe pas moins de 113.000 chevaux-vapeur, le septième de la France entière, et laisse loin derrière lui la Seine, qui vient en second lieu, avec 64.000 chevaux-vapeur et le Pas-de-Calais (55.000). Après ces trois départements, il faut citer la Seine-Inférieure et la Loire 38.000 chevaux-vapeur), Saône-et-Loire (35.000), Meurthe-et-Moselle (33.000), le Rhône (23.000), les Vosges (20.000).

— En Algérie, les chaudières en activité se sont réparties de la façon suivante : Alger, 351 ; Constantine, 226 ; Oran, 207.

Epreuves règlementaires exécutées en 1889. — Le nombre des chaudières soumises aux épreuves est de 17.828, inférieur de 438 unités (2 p. 100) à celui des épreuves exécutées pendant l'année antérieure. Cette diminution a porté à la fois sur les épreuves de chaudières anciennes et sur celles qui ont eu pour objectif les récipients neufs. Le nombre des chaudières neuves éprouvées a dépassé de 226 unités celui de 1888.

L'augmentation considérable du nombre des épreuves exécutées en 1881 tient aux dispositions du décret du 30 avril 1880, qui ont été mises en vigueur dans le deuxième semestre de ladite année. D'après ces dispositions, l'intervalle entre deux épreuves co..sécutives ne peut, en aucun cas, être supérieur à dix années et, d'un autre côté, les récipients, du moins ceux d'une capacité de plus de 100 litres, qui avaient cessé d'être soumis à la surveillance du service des mines depuis un certain nombre d'années, se trouvent de nouveau assujettis à la déclaration et à l'épreuve. Aussi le

nombre des épreuves a-t-il pris un accroissement anormal pendant la période de régularisation. Les installations de chaudières neuves ont diminué, à la suite de la crise financière de 1883, mais une reprise se manifeste depuis 1888.

Les épreuves les plus nombreuses ont été effectuées par le service ordinaire des mines, comme d'habitude, dans les départements de la Seine (2535) et du Nord (2121).

— En Algérie, il a été procédé à 243 épreuves de toute sorte, non comprises dans les chiffres précédents, et dont 43 s'appliquent à des appareils neufs.

Proportion des chaudières neuves d'origine étrangère. — En raison des formalités auxquelles sont soumises les chaudières importées à leur entrée en France, l'Administration connaît le nombre annuel des chaudières expédiées en France par les constructeurs étrangers.

Ce nombre a été de 181 appareils fixes ou locomobiles, soit 5 pour 100 du total des appareils neufs du même genre éprouvés, à peu près comme en 1887 et 1888 ; de 8 locomotives, soit 2,5 pour 100, et de 8 chaudières de bateaux, 4,5 pour 100.

Principaux types des chaudières neuves éprouvés. — En laissant de côté les locomotives et les chaudières de bateaux, les chaudières neuves (fixes, mi-fixes ou locomobiles) éprouvées en France par le service ordinaire des mines et par celui du contrôle de l'exploitation des chemins de fer, soit dans les ateliers de construction, soit dans les établissements industriels, se répartissent de la manière suivante, d'après leur type :

	Nombre	Pour 100
Chaudières à foyer intérieur tubulaire. . . .	1.585	46
— à foyer intérieur non tubulaire. .	654	19
— à foyer extérieur.	723	21
— d'autres types.	507	14
ENSEMBLE, comme à la page 101.	3.469	100

Appareils à vapeur déclarés en France en 1889. — Ces appareils se classent, d'après les conditions auxquelles ils sont assujettis par les règlements, comme il suit :

		Neuves	Anciennes	Nombre total	Différence par rapport à 1888.
Chaudières placées à demeure.	1[re] catégorie. . .	581	461	1.222	— 96
	2[e] catégorie. . .	419	484	903	+ 55
	3[e] catégorie. . .	377	512	889	— 12
Locomobiles à emplacement variable.		593	575	1.168	+ 67
Locomotives.		115	65	180	+ 14
Total des chaudières.		2.085	2.277	4.362	+ 28
Récipients.		700	756	1,456	+ 183

En définitive, l'ensemble des déclarations a dépassé de 211 unités celui de l'année précédente.

Le nombre des chaudières neuves éprouvées en 1889 par les services locaux des mines et par celui du contrôle de l'exploitation des chemins de fer s'élevait à 3971. Si l'on déduit 179 chaudières éprouvées chez les constructeurs et destinées à des bateaux, il reste 3792 chaudières dont la mise en service nécesssitait la déclaration prescrite par le décret du 30 avril 1880. En comparant ce dernier nombre à celui des chaudières neuves déclarées (2085), on constate, comme l'année précédente, que pour environ 1700 de ces appareils, abstraction faite du stock, les formalités réglementaires n'avaient pas encore été remplies au 31 décembre 1889. On est donc forcé d'en conclure qu'un grand nombre d'industriels ont négligé de faire la déclaration prescrite.

Surveillance. — Les appareils surveillés par les associations de propriétaires d'appareils à vapeur forment environ 15 pour 100 des chaudières en usage dans les établissements industriels et divers, chaudières dont le nombre, non compris les appareils appartenant à l'Etat, s'est élevé en 1889, à 67.528. Cette proportion ne ressortait qu'à 8,2 pour 100 en 1881, année à partir de laquelle ces associations ont commencé à fonctionner dans les conditions prévues par le décret de 1880, et elle a été chaque année en augmentant d'un peu moins d'une unité; elle était de 14,7 pour 100 en 1888.

Les onze sociétés susdésignées ont exercé leur action dans 68 départements.

SURVEILLANCE EXERCÉE PAR LES ASSOCIATIONS DE PROPRIÉTAIRES D'APPAREILS A VAPEUR

NOMS DES ASSOCIATIONS	NOMBRE TOTAL des CHAUDIÈRES des associés	NOMBRE TOTAL des ÉTABLISSEMENTS des associés	DÉPARTEMENTS OU LES CHAUDIÈRES SONT SITUÉES	NOMBRE DE CHAUDIÈRES DISTINCTES VISITÉES (au moins une fois) à l'intérieur et à l'extérieur	à l'extérieur seulement	TOTAL
Nord de la France. .	3.033	790	Nord, Pas-de-Calais, Meurthe-et-Moselle, Aisne.	1.819	1.212	3.031
Lyonnaise. . . .	1.538	461	Rhône, Allier, Loire, Isère. Ardèche, Nièvre, Ain, Saône-et-Loire, Drôme, Puy-de-Dôme, Côte-d'Or, Savoie, Haute-Savoie, Jura	1.336	14	1.482
Somme, Aisne, Oise. .	1.144	394	Aisne, Somme, Oise, Pas-de-Calais.	952	175	1.127
Parisienne. . . .	1.102	429	Seine, Seine-et-Oise, Seine-et-Marne, Loiret, Eure-et-Loir, Yonne, Sarthe, Loir-et-Cher, Indre-et-Loire, Aisne, Cher.	798	»	798
Alsacienne. . . .	978	318	Vosges, Meurthe-et-Moselle, Haute Saône, Doubs, territoire de Belfort.	671	261	932
Normande. . . .	708	294	Seine-Inférieure, Eure, Calvados, Orne, Oise, Manche.	532	119	651
Ouest.	389	218	Loire-Inférieure, Mayenne, Maine-et-Loire, Sarthe, Ille-et-Vilaine, Vendée, Morbihan, Finistère, Côtes-du-Nord, Deux-Sèvres.	379	10	389
Nord-Est. . . .	508	175	Marne, Ardennes, Aube. Haute-Marne, Meuse. . . .	286	137	423
Sud-Est.	492	116	Bouches-du-Rhône, Gard. Alpes-Maritimes, Vaucluse, Var.	415	51	466
Sud-Ouest. . .	316	94	Gironde, Charente, Landes, Lot-et-Garonne, Charente-Inférieure, Dordogne . . .	197	98	295
Méridionale. . . .	158	90	Hérault, Pyrénées-Orientales, Aude.	104	28	132
TOTAUX. . .	10.566	3.379	. . . .	7.489	2.237	9.725

Nombre des accidents et des victimes dans les établissements de différents genres. — Il y a eu 41 explosions occasionnées en France par l'emploi de la vapeur durant l'année 1889. Sur ce nombre, 18 n'ont causé que des blessures très légères, ou simplement des dégâts matériels. Aux 23 autres correspondent 30 personnes tuées et 14 blessées, ayant eu au moins vingt jours d'incapacité de travail.

Il s'est produit 12 accidents de plus qu'en 1888 : mais le nombre des morts ne s'est accru que d'un et celui des blessés a diminué de 9.

Les accidents et les victimes correspondantes se répartissent comme il suit par espèces d'appareils :

		Accidents	VICTIMES Tués	Blessés
Chaudières sans foyer intérieur.	Horizontales non tubulaires, avec ou sans bouilleur. .	8	4	1
	Horizontales plus ou moins tubulaires, avec ou sans bouilleurs.	»	»	»
	Verticales.	»	»	»
Chaudières avec foyer intérieur.	Horizontales non tubulaires.	4	3	»
	Horizontales plus ou moins tubulaires.	7	8	4
	Verticales.	1	1	»
Chaudières diverses.		9	2	4
Récipients et appareils assimilables. . .		12	12	5
	Totaux	41	30	14

Parmi ces accidents, quelques-uns ont présenté des conséquences graves sous le rapport du nombre des victimes ; on peut citer, à ce point de vue :

Dans une fabrique de tanin, à Cornil (Corrèze), l'explosion d'un récipient qui a déterminé la mort de 6 ouvrières et en a blessé 7 autres, dont 2 grièvement ;

L'explosion d'une chaudière cylindrique horizontale, à foyer intérieur, installée sur une drague, à la suite de laquelle 3 hommes furent tués et 5 blessés ;

Celle d'une machine locomobile, servant au battage des grains, qui a occasionné la mort de 2 personnes, des blessures à 7 ;

Celle d'un récipient installé sur un bateau à vapeur, par suite de laquelle 4 hommes ont été tués et 1 autre grièvement brûlé.

Sur les 41 accidents dus à l'emploi de la vapeur, en 1889, il en est arrivé 37 dans des établissements industriels, et 1 sur un chemin de fer (locomotive), et 3 sur des bateaux.

— Au point de vue des *causes présumées*, ces accidents se divisent de la manière suivante :

1° Conditions défectueuses d'établissement :		
Construction, disposition, installation, pièces ou matières défectueuses.		15
2° Conditions défectueuses d'entretien :		
Usure. — Fatigue ou amincissement du métal. — Fatigue par surchauffe sans manque d'eau. .	17	20
Réparations (pour d'autres causes) non faites ou défectueuses.	3	
3° Mauvais emploi des appareils :		
Manque d'eau (suivi ou non d'alimentation intempestive)	8	20
Excès de pression.	5	
Autres imprudences ou négligences	7	
4° Causes restées inconnues.		3
TOTAL		58

Le nombre total des causes présumées est supérieur de 17 unités à celui des accidents, parce que le même accident a plusieurs fois été attribué à différentes causes réunies.

Coup d'œil sur les accidents arrivés. — Les diagrammes ci-après figurent au moyen de bandes juxtaposées : 1° les nombres absolus ; 2° les nombres proportionnels des explosions pour 10,000 appareils (chaudières et récipients) et les nombres de victimes correspondants.

Ils permettent de se rendre compte de la fréquence et de la gravité des accidents, année par année, depuis 1880. Dans chacun de ces diagrammes[1], la ligne brisée représente le nombre des acci-

[1] Le diagramme du haut indique les nombres proportionnels pour 10.000 appareils ; le diagramme du bas indique les nombres absolus.

Nombres proportionnels pour 10.000 appareils

Victimes. Blessés. Tués.

accidents

Blessés sur 10.000 appar[ls]	3.6	1.1	2.2	6.4	4.0	3.2	2.3	1.6	2.1	1.3
Tués	3.6	1.7	4.3	4.1	4.6	3.3	3.2	1.6	2.7	2.8
Accidents	3.0	3.3	4.0	3.5	3.7	2.5	2.9	3.5	2.7	3.8

Victimes. Blessés. Tués.

accidents

Nombre des blessés	30	10	20	62	40	33	24	17	23	14
— des tués	30	15	40	40	46	34	33	17	29	30
— des accidents	25	29	37	34	37	25	30	36	29	41
ANNÉES	80	81	82	83	84	85	86	87	88	1889

Nombres absolus

Nombre annuel des accidents causés par la vapeur et des victimes

Échelles : 1/2 millimètre par accident et par victime.
2 1/2 millimètres par accident ou victime et par 10.000 appareils.

dents, y compris ceux qui n'ont pas été suivis de conséquences fâcheuses pour les personnes.

C'est à quelques accidents particulièrement meurtriers qu'est dû l'accroissement démesuré de certaines bandes verticales qui figurent les victimes dans les diagrammes.

En 1880, par suite de l'explosion d'une chaudière de bateau, dans le port de Bône, 13 personnes trouvèrent la mort et 17 autres furent plus ou moins grièvement blessées.

En 1883, aux forges de Marnaval (Haute-Marne), 30 ouvriers furent tués, 49 blessés grièvement et 12 légèrement par les éclats d'une chaudière de 15 mètres de hauteur, qui était reliée à la conduite générale de l'établissement et chauffée par les flammes de trois fours à puddler. Les morceaux de la chaudière furent lancés dans toutes les directions, disloquant et emportant la toiture, et les charpentes sur une superficie de 900 mètres carrés.

En 1884, aux forges d'Eurville (Haute-Marne), une explosion de chaudière chauffée par les flammes perdues de fours à puddler amena la mort de 22 ouvriers; 27 autres furent blessés, dont 21 grièvement.

Enfin, en 1888, une locomobile employée au battage des grains à Ciron (Indre) vola en éclats, tuant 8 hommes, en blessant 1 autre mortellement et 4 plus ou moins gravement.

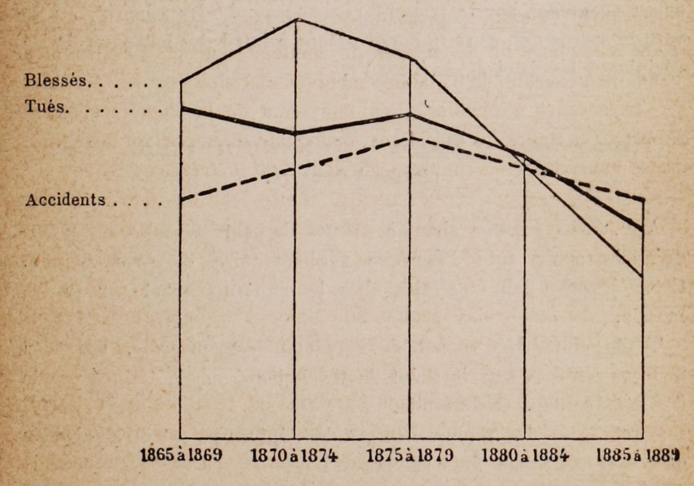
Le plus grave des accidents survenus en 1889, celui de Cornil (Corrèze), arrivé dans une fabrique de tanin, par suite de l'explosion d'un récipient, a causé la mort, comme on l'a vu précédemment, à 6 ouvriers et des blessures à 7 autres.

— Le nombre total des personnes tuées par des explosions d'appareils à vapeur depuis 25 ans est de 734, et celui des blessés ayant chômé plus de 20 jours, de 789. Conséquemment le nombre des morts est presque aussi considérable que celui des blessés.

Le nombre annuel des accidents s'accroît naturellement avec celui des appareils (qui était de 53,295 en 1865 et s'élevait à 108.906 en 1889); mais l'augmentation est légère. Si l'on considère la proportion des explosions par 10.000 appareils, on trouve qu'elle tend plutôt à diminuer. En tous cas, le diagramme supérieur met en évidence une diminution marquée du nombre correspondant des morts et des blessés.

Si l'on groupe les nombres proportionnels par périodes quinquennales, on obtient les moyennes annuelles suivantes :

PÉRIODES	PAR 10.000 APPAREILS		
	Accidents	Morts	Blessés
1865 à 1869.	3.1	4.3	4 7
1870 à 1874.	3.5	4.0	5.5
1875 à 1879.	3.9	4.2	5.0
1880 à 1884.	3.5	3.7	3.5
1885 à 1889.	3.1	2.7	2 1



Les chiffres et le diagramme ci-dessus montrent bien les progrès qui ont été accomplis, principalement dans la dernière période, sous le rapport de la sécurité.

II

DÉCRET DU 30 AVRIL 1880 SUR L'EMPLOI DES GÉNÉRATEURS ET RÉCIPIENTS DE VAPEUR

ARTICLE PREMIER. — Sont soumis aux formalités et aux mesures prescrites par le présent règlement : 1° les générateurs de vapeur autres que ceux qui sont placés à bord des bateaux ; 2° les récipients définis ci-après (titre V).

TITRE PREMIER. — **Mesures de sûreté relatives aux chaudières placées à demeure.**

ART. 2. — Aucune chaudière neuve ne peut être mise en service qu'après avoir subi l'épreuve réglementaire ci-après définie. Cette épreuve doit être faite chez le constructeur et sur sa demande.

Toute chaudière venant de l'étranger est éprouvée, avant sa mise en service, sur le point du territoire français désigné par le destinataire dans sa demande.

ART. 3. — Le renouvellement de l'épreuve peut être exigé de celui qui fait usage d'une chaudière :

1° Lorsque la chaudière, ayant déjà servi, est l'objet d'une nouvelle installation ;

2° Lorsqu'elle a subi une réparation notable ;

3° Lorsqu'elle est remise en service après un chômage prolongé.

A cet effet, l'intéressé devra informer l'ingénieur des mines de ces diverses circonstances. En particulier, si l'épreuve exige la démolition du massif du fourneau ou l'enlèvement de l'enveloppe de la chaudière et un chômage plus ou moins prolongé, cette épreuve pourra ne point être exigée, lorsque des renseignements authentiques sur l'époque et les résultats de la dernière visite, intérieure et extérieure, constitueront une présomption suffisante en faveur du bon état de la chaudière. Pourront être notamment considérés comme renseignements probants les certificats délivrés aux mem-

bres des associations de propriétaires d'appareils à vapeur par celles de ces associations que le Ministre aura désignés.

Le renouvellement de l'épreuve est exigible également lorsque, à raison des conditions dans lesquelles une chaudière fonctionne, il y a lieu, par l'ingénieur des mines, d'en suspecter la solidité.

Dans tous les cas, lorsque celui qui fait usage d'une chaudière contestera la nécessité d'une nouvelle épreuve, il sera, après une instruction où celui-ci sera entendu, statué par le préfet.

En aucun cas, l'intervalle entre deux épreuves consécutives n'est supérieur à dix années. Avant l'expiration de ce délai, celui qui fait usage d'une chaudière à vapeur doit lui-même demander le renouvellement de l'épreuve.

Art. 4. — L'épreuve consiste à soumettre la chaudière à une pression hydraulique supérieure à la pression effective qui ne doit point être dépassée dans le service. Cette pression d'épreuve sera maintenue penant le temps nécessaire à l'examen de la chaudière, dont toutes les parties doivent pouvoir être visitées.

La surcharge d'épreuve par centimètre carré est égale à la pression effective sans jamais être inférieure à un demi-kilogramme ni supérieure à 6 kilogrammes.

L'épreuve est faite sous la direction de l'ingénieur des mines et en sa présence, ou, en cas d'empêchement, en présence du garde-mines opérant d'après ses instructions.

Elle n'est pas exigée pour l'ensemble d'une chaudière dont les diverses parties, éprouvées séparément, ne doivent être réunies que par des tuyaux placés, sur tout leur parcours, en dehors du foyer et des conduits de flamme, et dont les joints peuvent être facilement démontés.

Le chef de l'établissement où se fait l'épreuve fournit la main-d'œuvre et les appareils nécessaires à l'opération.

Art. 5. — Après qu'une chaudière ou partie de chaudière a été éprouvée avec succès, il y est apposé un timbre indiquant, en kilogrammes par centimètre carré, la pression effective que la vapeur ne doit pas dépasser.

Les timbres sont poinçonnés et reçoivent trois nombres indiquant le jour, le mois et l'année de l'épreuve.

Un de ces timbres est placé de manière à être toujours apparent après la mise en place de la chaudière.

ART. 6. — Chaque chaudière est munie de deux soupapes de sûreté, chargées de manière à laisser la vapeur s'écouler dès que sa pression effective atteint la limite maximum indiquée par le timbre réglementaire.

L'orifice de chacune des soupapes doit suffire à maintenir, celle-ci étant au besoin convenablement déchargée ou soulevée et quelle que soit l'activité du feu, la vapeur dans la chaudière à un degré de pression qui n'excède, pour aucun cas, la limite ci-dessus.

Le constructeur est libre de répartir, s'il le préfère, la section totale d'écoulement nécessaire des deux soupapes réglementaires entre un plus grand nombre de soupapes.

ART. 7. — Toute chaudière est munie d'un manomètre en bon état placé en vue du chauffeur et gradué de manière à indiquer en kilogrammes la pression effective de la vapeur dans la chaudière.

Une marque très apparente indique sur l'échelle du manomètre la limite que la pression effective ne doit pas dépasser.

La chaudière est munie d'un ajutage terminé par une bride de quatre centimètres ($0^m,04$) de diamètre et cinq millimètres ($0^m,005$) d'épaisseur disposée pour recevoir le manomètre vérificateur.

ART. 8. — Chaque chaudière est munie d'un appareil de retenue, soupape ou clapet, fonctionnant automatiquement et placé au point d'insertion du tuyau d'alimentation qui lui est propre.

ART. 9. — Chaque chaudière est munie d'une soupape ou d'un robinet d'arrêt de vapeur, placé, autant que possible, à l'origine des tuyaux de conduite de vapeur, sur la chaudière même.

ART. 10. — Toute paroi en contact par une de ses faces avec la flamme doit être baignée par l'eau sur sa face opposée.

Le niveau de l'eau doit être maintenu, dans chaque chaudière, à une hauteur de marche telle qu'il soit, en toute circonstance, à six centimètres ($0^m,06$) au moins au-dessus du plan pour lequel la condition précédente cesserait d'être remplie. La position limite sera indiquée, d'une manière très apparente, au voisinage du tube de niveau mentionné à l'article suivant.

Les prescriptions énoncées au présent article ne s'appliquent point :

1° Aux surchauffeurs de vapeur distincts de la chaudière.

2° A des surfaces relativement peu étendues et placées de manière

à ne jamais rougir, même lorsque le feu est poussé à son maximum d'activité, telles que les tubes ou parties de cheminée qui traversent le réservoir de vapeur, en envoyant directement à la cheminée principale les produits de la combustion.

Art. 11. — Chaque chaudière est munie de deux appareils indicateurs du niveau de l'eau, indépendants l'un de l'autre, et placés en vue de l'ouvrier chargé de l'alimentation.

L'un de ces deux indicateurs est un tube en verre, disposé de manière à pouvoir être facilement nettoyé et remplacé au besoin.

Pour les chaudières verticales de grande hauteur, le tube en verre est remplacé par un appareil disposé de manière à reporter en vue de l'ouvrier chargé de l'alimentation, l'indication du niveau de l'eau dans la chaudière.

Titre II. — **Établissement des chaudières à vapeur placées à demeure.**

Art. 12. — Toute chaudière à vapeur destinée à être employée à demeure ne peut être mise en service qu'après une déclaration adressée par celui qui fait usage du générateur au préfet du département. Cette déclaration est enregistrée à sa date. Il en est donné acte. Elle est communiquée sans délai à l'ingénieur en chef des mines.

Art. 13. — La déclaration fait connaître avec précision :

1° Le nom et le domicile du vendeur de la chaudière ou l'origine de celle-ci ;

2° La commune et le lieu où elle est établie ;

3° La forme, la capacité et la surface de chauffe ;

4° Le numéro du timbre réglementaire ;

5° Un numéro distinctif de la chaudière, si l'établissement en possède plusieurs.

6° Enfin, le genre d'industrie et l'usage auquel elle est destinée.

Art. 14. — Les chaudières sont divisées en trois catégories.

Cette classification est basée sur le produit de la multiplication du nombre exprimant en mètres cubes la capacité totale de la chaudière (avec ses bouilleurs et ses réchauffeurs alimentaires, mais sans y comprendre les surchauffeurs de vapeur), par le nom-

bre exprimant, en degrés centigrades, l'excès de la température de l'eau correspondant à la pression indiquée par le timbre réglementaire sur la température de 100 degrés, conformément à la table annexée au présent décret (page 321).

Si plusieurs chaudières doivent fonctionner ensemble dans un même emplacement et s'ils ont entre elles une communication quelconque, directe ou indirecte, on prend, pour former le produit comme il vient d'être dit, la somme des capacités de ces chaudières.

Les chaudières sont de la première catégorie quand le produit est plus grand que 200; de la deuxième, quand le produit n'excède pas 200, mais surpasse 50; de la troisième, si le produit n'excède pas 50.

Art. 15. — Les chaudières comprises dans la première catégorie doivent être établies en dehors de toute maison d'habitation et de tout atelier surmonté d'étages. N'est pas considéré comme un étage au-dessus de l'emplacement d'une chaudière, une construction dans laquelle ne se fait aucun travail nécessitant la présence d'un personnel à poste fixe.

Art. 16. — Il est interdit de placer une chaudière de première catégorie à moins de trois mètres (3^m) d'une maison d'habitation.

Lorsqu'une chaudière de première catégorie est placée à moins de dix mètres (10^m) d'une maison d'habitation, elle en est séparée par un mur de défense.

Ce mur, en bonne et solide maçonnerie, est construit de manière à défiler la maison par rapport à tout point de la chaudière distant de moins de dix mètres (10^m), sans toutefois que sa hauteur dépasse de un mètre (1^m) la partie la plus élevée de la chaudière. Son épaisseur est égale au tiers au moins de sa hauteur, sans que cette épaisseur puisse être inférieure à un mètre (1^m) en couronne. Il est séparé du mur de la maison voisine par un intervalle libre de trente centimètres ($0^m,30$) de largeur au moins.

L'établissement d'une chaudière de première catégorie à la distance de dix mètres (10^m) ou plus d'une maison d'habitation n'est assujetti à aucune condition particulière.

Les distances de trois mètres (3^m) et de dix mètres (10^m), fixées ci-dessus, sont réduites respectivement à un mètre cinquante centimètres ($1^m,50$) et à cinq mètres (5^m), lorsque la chaudière est

enterrée de façon que la partie supérieure de ladite chaudière se trouve à un mètre (1^m) en contre-bas du sol, du côté de la maison voisine.

ART. 17. — Les chaudières comprises dans la deuxième catégorie peuvent être placées dans l'intérieur de tout atelier, pourvu que l'atelier ne fasse pas partie d'une maison d'habitation.

Les foyers sont séparés des murs des maisons voisines par un intervalle libre de un mètre (1^m) au moins.

ART. 18. — Les chaudières de troisième catégorie peuvent être établies dans un atelier quelconque, même lorsqu'il fait partie d'une maison d'habitation.

Les foyers sont séparés des murs des maisons voisines par un intervalle libre de cinquante centimètres (0^m,50) au moins.

ART. 19. — Les conditions d'emplacement prescrites, pour les chaudières à demeure, par les précédents articles, ne sont pas applicables aux chaudières pour l'établissement desquelles il aura été satisfait au décret du 25 janvier 1865, antérieurement à la promulgation du présent règlement.

ART. 20. — Si, postérieurement à l'établissement d'une chaudière, un terrain contigu vient à être affecté à la construction d'une maison d'habitation, celui qui fait usage de la chaudière devra se conformer aux mesures prescrites par les articles 16, 17 et 18, comme si la maison eût été construite avant l'établissement de la chaudière.

ART. 21. — Indépendamment des mesures générales de sûreté prescrites au titre Ier et de la déclaration prévue par les articles 12 et 13, les machines à vapeur fonctionnant dans l'intérieur des mines sont soumises aux conditions que pourra prescrire le préfet, suivant le cas et sur le rapport de l'ingénieur des mines.

TITRE III. — **Chaudières locomobiles.**

ART. 22. — Sont considérées comme locomobiles les chaudières à vapeur qui peuvent être transportées facilement d'un lieu à un autre, n'exigent aucune construction pour fonctionner sur un point donné, et ne sont employées que d'une manière temporaire à chaque station.

Art. 23. — Les dispositions des articles 2 à 11 inclusivement du présent décret sont applicables aux chaudières locomobiles.

Art. 24. — Chaque chaudière porte une plaque sur laquelle sont gravées, en caractères très apparents, le nom et le domicile du propriétaire et un numéro d'ordre, si ce propriétaire possède plusieurs chaudières locomobiles.

Art. 25. — Elle est l'objet de la déclaration prescrite par les articles 12 et 13. Cette déclaration est adressée au préfet du département où est le domicile du propriétaire.

L'ouvrier chargé de la conduite devra représenter à toute réquisition le récipissé de cette déclaration.

Titre IV. — Chaudières des machines locomotives.

Art. 26. — Les chaudières à vapeur locomotives sont celles qui, sur terre, travaillent en même temps qu'elles se déplacent par leur propre force, telles que les machines des chemins de fer et des ramways, les machines routières, les rouleaux compresseurs, etc.

Art. 27. — Les dispositions des articles 2 à 8 inclusivement et celles des articles 11 et 24 sont applicables aux chaudières des machines locomotives.

Art. 28. — Les dispositions de l'artiele 25, § 1er, s'appliquent également à ces chaudières.

Art. 29. — La circulation des machines locomotives a lieu dans les conditions déterminées par des règlements spéciaux.

Titre V. — Récipients.

Art. 30. — Sont soumis aux dispositions suivantes, les récipients de formes diverses, d'une capacité de plus de 100 litres, au moyen desquels les matières à élaborer sont chauffées, non directement à feu nu, mais par de la vapeur empruntée à un générateur distinct, lorsque leur communication avec l'atmosphère n'est point établie par des moyens excluants toute pression effective nettement appréciable.

Art. 31. — Ces récipients sont assujettis à la déclaration prescrite par les articles 12 et 13.

Ils sont soumis à l'épreuve, conformément aux articles 2, 3 4 et 5.

Toutefois, la surcharge d'épreuve sera, dans tous les cas, égale à la moitié de la pression maximum à laquelle l'appareil doit fonctionner, sans que cette surcharge puisse excéder 4 kilogrammes par centimètre carré.

Art. 32. — Ces récipients sont munis d'une soupape de sûreté réglée pour la pression indiquée par le timbre, à moins que cette pression ne soit égale ou supérieure à celle fixée pour la chaudière alimentaire.

L'orifice de cette soupape, convenablement déchargée ou soulevée au besoin, doit suffire à maintenir, pour tous les cas, la vapeur dans le récipient à un degré de pression qui n'excède pas la limite du timbre.

Elle peut être placée, soit sur le récipient lui-même, soit sur le tuyau d'arrivée de la vapeur, entre le robinet et le récipient.

Art. 33. — Les dispositions des articles 30, 31 et 32 s'appliquent également aux réservoirs dans lesquels de l'eau à haute température est emmagasinée, pour fournir ensuite un dégagement de vapeur ou de chaleur, quel qu'en soit l'usage.

Art. 34. — Un délai de six mois, à partir de la promulgation du présent décret, est accordé pour l'exécution des quatre articles qui précèdent.

Titre VI. — **Dispositions générales.**

Art. 35. — Le ministre peut, sur le rapport des ingénieurs des mines, l'avis du préfet et celui de la Commission centrale des machines à vapeur, accorder dispense de tout ou partie des prescriptions du présent décret, dans tous les cas où, à raison soit de la forme, soit de la faible dimension des appareils, soit de la position spéciale des pièces contenant de la vapeur, il serait reconnu que la dispense ne peut pas avoir d'inconvénient.

Art. 36. — Ceux qui font usage de générateurs ou de récipients de vapeur veilleront à ce que tous ces appareils soient entretenus constamment en bon état de service.

A cet effet, ils tiendront la main à ce que des visites complètes, tant à l'intérieur qu'à l'extérieur, soient faites, à des intervalles

rapprochés, pour constater l'état des appareils et assurer l'exécution, en temps utile, des réparations ou remplacements nécessaires.

Ils devront informer les ingénieurs des réparations notables faites aux chaudières et aux récipients, en vue de l'exécution des articles 3 (1°, 2° et 3°) et 31, § 2.

Art. 37. — Les contraventions au présent règlement sont constatées, poursuivies et réprimées conformément aux lois.

Art. 38. — En cas d'accident ayant occasionné la mort ou des blessures, le chef de l'établissement doit prévenir immédiatement l'autorité chargée de la police locale et l'ingénieur des mines chargé de la surveillance. L'ingénieur se rend sur les lieux, dans le plus bref délai, pour visiter les appareils, en constater l'état et rechercher les causes de l'accident; il rédige sur le tout :

1° Un rapport qu'il adresse au procureur de la République et dont une expédition est transmise à l'ingénieur en chef, qui fait parvenir son avis à ce magistrat;

2° Un rapport qui est adressé au préfet par l'intermédiaire et avec l'avis de l'ingénieur en chef.

En cas d'accident n'ayant occasionné ni mort ni blessure, l'ingénieur des mines seul est prévenu; il rédige un rapport qu'il envoie, par l'intermédiaire et avec l'avis de l'ingénieur en chef, au préfet.

En cas d'explosion, les constructions ne doivent point être réparées, et les fragments de l'appareil rompu ne doivent point être déplacés ou dénaturés avant la constatation de l'état des lieux par l'ingénieur.

Art. 39. — Par exception, le ministre pourra confier la surveillance des appareils à vapeur aux ingénieurs ordinaires et aux conducteurs des ponts et chaussées, sous les ordres de l'ingénieur en chef des mines de la circonscription.

Art. 40. — Les appareils à vapeur qui dépendent des services spéciaux de l'État sont surveillés par les fonctionnaires et agents des services.

Art. 41. — Les attributions conférées aux préfets des départements par le présent décret sont exercées par le Préfet de Police dans toute l'étendue de son ressort.

Fait à Paris, le 30 avril 1880.

Jules GRÉVY.

Le ministre des travaux publics, H. VARROY.

Table

DONNANT LA TEMPÉRATURE (EN DEGRÉS CENTIGRADES) DE L'EAU CORRESPONDANT A UNE PRESSION DONNÉE (EN KILOGRAMMES EFFECTIFS)

VALEURS CORRESPONDANTES					
De la pression effective EN KILOGRAMMES			De la température EN DEGRÉS CENTIGRADES		
0.5	7.5	14.5	111	173	199
1.0	8.0	15.0	120	175	200
1.5	8.5	15.5	127	177	202
2.0	9.0	16.0	133	179	203
2.5	9.5	16.5	138	181	205
3.0	10.0	17.0	143	183	206
3.5	10.5	17.5	147	185	208
4.0	11.0	18.0	151	187	209
4.5	11.5	18.5	155	189	210
5.0	12.0	19.0	158	191	211
5.5	12.5	19.5	161	193	213
6.0	13.0	20.0	164	194	214
6.5	13.5		167	196	
7.0	14.0		170	197	

III

DÉCRET DU 29 JUIN 1886 CONCERNANT LES CHAUDIÈRES A VAPEUR

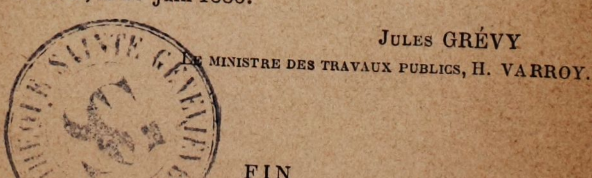
Article premier. — Lorsque plusieurs générateurs de vapeur, placés à demeure, sont groupés sur une conduite générale de vapeur, en nombre tel que le produit, formé comme il est dit à l'article 14 du décret du 30 avril 1880, en prenant comme base du calcul le timbre réglementaire le plus élevé, dépasse le nombre 1800, lesdits générateurs sont répartis par séries correspondant chacune à un produit au plus égal à ce nombre; chaque série est munie d'un clapet automatique d'arrêt, disposé de façon à éviter, en cas d'explosion, le déversement de la vapeur des séries restées intactes.

Art. 2. — Lorsqu'un générateur de première catégorie est chauffé par les flammes perdues d'un ou plusieurs fours métallurgiques, tout le courant des gaz chauds doit, en arrivant au contact des tôles, être dirigé tangentiellement aux parois de la chaudière.

A cet effet, si les rampants destinés à amener les flammes ne sont pas construits de façon à assurer ce résultat, les tôles exposées aux coups de feu sont protégées, en face des débouchés de rampants dans les carneaux, par des murettes en matériaux réfractaires, distantes des tôles d'au moins 58 millimètres et suffisamment étendues dans tous les sens pour que les courants de gaz chauds prennent des directions sensiblement tangentielles aux surfaces des tôles voisines, avant de les toucher.

Art. 3. — Les dispositions de l'article 35 du décret du 30 avril 1880 sont applicables aux prescriptions du présent règlement.

Fait à Paris, le 29 juin 1886.



Jules GRÉVY

Le ministre des travaux publics, H. VARROY.

FIN

TABLE DES MATIÈRES

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES

LYON. — IMPRIMERIE PITRAT AÎNÉ, 4, RUE GENTIL

en parfumerie : acide acétique, alcool, ammoniaque, glycérine, paraffine, vaseline, cold cream, etc.

Le chapitre, le plus développé, puisqu'il comprend seul plus de cent cinquante pages, est consacré à l'étude des *parfums d'origine végétale*.

La culture des roses en Bulgarie et en Provence a été l'objet d'une étude entièrement nouvelle.

Un chapitre est consacré aux parfums d'origine animale. Le Musc y est étudié avec des développements tout particuliers.

On arrive ensuite à l'emploi des parfums, et on passe de l'histoire naturelle à l'*hygiène cosmétique*. L'*hygiène des cheveux* est tout d'abord l'objet d'une longue étude : les teintures et les préparations épilatoires, les cosmétiques et les bandolines, le Kohol pour les sourcils, etc., sont minutieusement passés en revue.

Vient ensuite l'*hygiène des ongles* et *des dents*, avec les poudres et eaux dentifrices. Le chapitre se termine par l'étude des alcoolats, vinaigres, bains aromatiques, émulsines, fards, rouges, etc.

Un dernier chapitre est consacré aux *applicatioas générales des parfums*.

Le deuxième volume CHIMIE DES PARFUMS ET FABRICATION DES SAVONS, ODEURS, ESSENCES, ETC., est spécialement consacré à la *nature* et à la *composition chimique des parfums* et à leur *fabrication industrielle*.

Le premier chapitre est consacré à l'étude de l'*origine* et de la *nature des parfums*.

L'*extraction des parfums* fait l'objet du deuxième chapitre : les procédés par expression, par distillation, par macération, par enfleurage, par la méthode pneumatique et par dissolution sont successivement passés en revue. Les procédés tout nouveaux de MM. Camille Vincent et Laurent Naudin sont exposés en détail.

Le troisième chapitre est consacré aux *essences*, à leurs propriétés générales et particulières, à leur analyse chimique et à leurs falsifications.

Le quatrième chapitre étudie les applications de la chimie organique à la parfumerie, pour la production des *essences artificielles*.

Le cinquième chapitre est consacré aux *savons*, et à leur *fabrication industrielle*.

Trente-cinq figures nouvelles (en tout plus de cinquante) montrent toute l'importance donnée à cette partie, simplement ébauchée dans la précédente édition.

Le sixième chapitre étudie les principales *substances employées par le parfumeur*, alcool, acide acétique, ammoniaque, couleurs, etc.

Un *formulaire cosmétique* forme le septième chapitre et termine le deuxième volume. On y trouvera une grande variété de formules pour essences et extraits, bouquets et eaux composées, savons, émulsines, pâtes, eaux et teintures pour cheveux, pommades et huiles parfumées, dentifrices, rouges et poudres absorbantes, poudres à sachets, parfums à brûler, vinaigres et sels.

CHEVREUL. **Recherches chimiques sur les corps gras.** 1823, 1 vol. in-8, avec pl. .... 60 fr.

RÉVEIL. **Des cosmétiques** au point de vue de l'hygiène et de la police médicale. In-8 .... 1 fr 50

ENVOI FRANCO CONTRE UN MANDAT SUR LA POSTE

PETITE BIBLIOTHÈQUE MÉDICALE

A 2 FR. LE VOLUME

Nouvelle collection de volumes in-16 comprenant 200 pages et illustré de figures

BALL. **La folie érotique**, par B. BALL, professeur à la Faculté de médecine de Paris, membre de l'Académie de médecine. 160 p. 2 fr.

BASTIDE. **Les vins sophistiqués**, procédés simples pour reconnaître les sophistications les plus usuelles. 160 p.................... 2 fr.

BOERY. **Les plantes oléagineuses** et leurs produits (huiles et tourteaux) et les plantes alimentaires des pays chauds (cacao, café, canne à sucre, etc.). 160 p., 22 fig.................................. 2 fr.

BOURGEOIS. **Les passions** dans leurs rapports avec la santé et les maladies. L'amour et le libertinage. 4e *édition*, 214 p.......... 2 fr.

BRAMSEN. **Les dents de nos enfants**. Conseils aux mères de familles. 144 p., 50 fig.. 2 fr.

CAUVET. **Procédés pratiques pour l'essai des farines**. Caractères. altérations, falsifications, par D. CAUVET, professeur à la Faculté de médecine de Lyon. 100 p., 74 fig................................ 2 fr.

CORFIELD. **Les maisons d'habitation**, leur construction et leur aménagement selon les règles de l'hygiène par W.-H. CORFIELD, professeur au Collège de l'Université de Londres. 160 p., 54 fig.......... 2 fr.

CORLIEU. **La prostitution à Paris**. 128 p.................. 2 fr.

DECHAUX. **La femme stérile**. 2e *édition*, 214 p.............. 2 fr.

GAUTIER (J.). **La fécondation artificielle** et son emploi contre la stérilité chez la femme. 142 p.................................. 2 fr.

GOURRIER. **Les lois de la génération**, sexualité et conception. 200 p. 2 fr.

GIRARD et de BREVANS. **La Margarine et le beurre artificiel**, par Ch. GIRARD, directeur du Laboratoire municipal de la préfecture de police et J. de BREVANS. 172 p...................................... 2 fr.

GROS. **Mémoires d'un estomac**. 4e *édition*, 186 p............ 2 fr.

JOLLY. **Le tabac et l'absinthe**, leur influence sur la santé, par P. JOLLY, membre de l'Académie de médecine. 2e *édition*, 228 p. 2 fr.

— **Hygiène morale**. L'homme, la vie, l'instinct, la curiosité, l'imitation, l'habitude, la mémoire, l'imagination, la volonté. 276 p........ 2 fr.

MAGNE (A.). **Hygiène de la vue**. 4e *édition*, 300 p.......... 2 fr.

MAYER (A.). **L'âge de retour**. Conseils aux femmes. 256 p... 2 fr.

MONAVON. **La coloration artificielle des vins**. 164 p..... 2 fr.

MONTEUUIS. **Les enfants aux bains de mer**, avec fig. 150 p. 2 fr.

MURRELL. **La pratique du massage**, action physiologique, emploi thérapeutique. Introduction par le Dr DUJARDIN-BEAUMETZ, membre de l'Académie de médecine. 168 p., avec fig.......................... 2 fr.

PÉRIER. **La première enfance**, guide hygiénique des mères et des nourrices. 3e *édition*, 200 p., avec fig......................... 2 fr.

— **La seconde enfance**, guide hygiénique des mères et des personnes appelées à diriger l'éducation de la jeunesse. 236 p............ 2 fr.

RECLU. **Manuel de l'herboriste**. Culture, récolte, conservation, propriétés médicinales des plantes du commerce. 160 p., 52 fig.... 2 fr.

SAPORTA (A. de). **La chimie des vins**. Les vins naturels. les vins manipulés et falsifiés. 160 p., avec fig......................... 2 fr.

ZABOROWSKI. **Les boissons hygiéniques**. 160 p., 24 fig... 2 fr.

BIBLIOTHÈQUE MÉDICALE VARIÉE

A 3 FR. 50 LE VOLUME

BARTHÉLEMY (T.). **Syphilis et santé publique.** Etude d'hygiène publique, par T. Barthélemy, médecin de Saint-Lazare, ancien chef de clinique de la Faculté de médecine. 1890, 1 vol. in-16 de 350 p. 3 fr. 50

CORIVEAUD. **Le lendemain du mariage.** Etude d'hygiène. 2ᵉ *édition*, 1889, 1 vol. in-16........ 3 fr. 50

— **Hygiène de la jeune fille.** 1 vol. in-16........ 3 fr. 50

— **La santé de nos enfants.** 1890, 1 vol. in-16 de 320 p... 3 fr. 50

— **Hygiène des familles.** 1890, 1 vol. in-16 de 320 p........ 3 fr. 50

COUVREUR. **Les exercices du corps,** le développement de la force et de l'adresse, étude scientifique. 1 vol. in-16 de 351 p., avec 59 fig. 3 fr. 50

CULLERE. **Nervosime et névroses.** Hygiène des énervés et des névropathes. 1 vol. in-16 de 352 p........ 3 fr. 50

— **Magnétisme et hypnotisme.** Exposé des phénomènes observés pendant le sommeil nerveux provoqué, au point de vue psychologique, thérapeuthique et médico-légal. 1 vol. in-16 de 358 pages, avec 28 figures........ 3 fr 50

— **Les frontières de la folie.** 1 vol. in-16 de 360 p......... 3 fr. 50

DYR. **Scènes de la vie médicale.** 1 vol. in-16 de 300 p..... 3 fr. 50

DONNÉ (A.). **Hygiène des gens du monde,** par A. Donné, inspecteur général de Écoles de médecine. 2ᵉ *édition*, 1 vol. in-16 de 448 p. 3 fr. 50

GALEZOWSKI et KOPFF. **Hygiène de la vue,** par les docteurs Galezowski et Kopff. 1 vol. in-16 de 328 p., avec 44 fig........ 3 fr. 50

RÉVEILLÉ-PARISE et CARRIÈRE. **Hygiène de l'Esprit.** Physiologie et hygiène des hommes livrés aux travaux intellectuels, gens de lettres, artistes, savants, hommes d'État, jurisconsultes, administrateurs, par J.-H. Réveillé-Parise, membre de l'Académie de médecine, et Ed. Carrière, lauréat de l'Institut. 1 vol. in-16 de 435 p........ 3 fr. 50

— **La goutte et les rhumatismes.** 1 vol. in-16 de 306 p.. 3 fr. 50

RIANT. **Les Irresponsables devant la justice,** par le Dʳ A. Riant. 1 vol. in-16 de 306 p........ 3 fr 50

— **Hygiènedes orateurs,** hommes poliques, magistrats, avocats, prédicateurs, professeurs, artistes et de tous ceux qui sont appelés à parler en public. 1 vol. in-16 de 500 p........ 3 fr. 50

— **Le Surmenage intellectuel** et les exercices physiques. 1 vol. in-16 de 312 p........ 3 fr. 50

RICHARD (Dʳ David). **Histoire de la génération** chez l'homme et chez la femme, 2ᵉ *édition*, 1883, 1 volume in-18 jésus de 360 p., avec fig. 3 fr. 50

RICHARD (E.). **La prostitution à Paris,** par E. Richard, conseiller municipal. 1890, 1 vol. in-18 de 320 pages........ 3 fr. 50

SIMON. **Le monde des rêves.** Le rêve, l'hallucination, le somnambulisme et l'hypnotisme, l'illusion, les paradis artificiels, etc. 2ᵉ *édition*, 1 vol. in-16 de 325 p........ 3 fr, 50

BIBLIOTHÈQUE SCIENTIFIQUE CONTEMPORAINE

A 3 FR. 50 LE VOLUME

Nouvelle collection de volumes in-16, comprenant 300 à 400 pages

Imprimés en caractères elzéviriens et illustrés de figures intercalées dans le texte

80 volumes sont publiés

BERNARD (CLAUDE). **La science expérimentale**, par Claude BERNARD, de l'Académie des sciences et de l'Académie française. 3e *édition*, 1 vol. in-16 de 449 p., avec 19 fig. .... 3 fr. 50

BOUANT. **La galvanoplastie**, le nickelage, l'argenture, la dorure et l'électro-métallurgie, par E. BOUANT, agrégé des sciences. 1 vol. in-16 de 308 p., avec 34 fig. .... 3 fr. 50

COTTEAU (G.). **Le préhistorique en Europe**, congrès, musées, excursions, par G. COTTEAU, correspondant de l'Institut. 1 vol. in-16 de 313 p., avec 87 fig. .... 3 fr. 50

COUVREUR (ED.). **Le microscope et ses applications** à l'étude des animaux et des végétaux, par Ed. COUVREUR, chef des travaux à la Faculté des sciences de Lyon. 1 vol. in-16 de 350 p., avec 112 fig. .... 3 fr. 50

DALLET (G.). **Les merveilles du ciel**, par G. DALLET. 1 vol. in-16 de 372 p., avec 74 fig. .... 3 fr. 50

— **La prévision du temps** et les prédications météorologiques. 1 vol. in-16 de 336 p., avec 39 fig. .... 3 fr. 50

DEBIERRE. **L'homme avant l'histoire**, par CH. DEBIERRE, professeur à la Faculté de Lille. 1 vol. in-16 de 304 p., avec 84 fig. .... 3 fr. 50

FOLIN (de). **Sous les mers**. Campagne d'explorations du *Travailleur* et du *Talisman*, par le marquis de FOLIN, membre de la Commission des Dragages. 1 vol. in-16 de 340 p., avec 45 fig. .... 3 fr. 50

FOUQUÉ. **Les tremblements de terre**, par FOUQUÉ, membre de l'Institut. 1 vol. in-16 de 328 p., avec 44 fig. .... 3 fr. 50

GIRARD (M.). **Les abeilles**. Organes et fonctions, éducation et produits, miel et cire. 1 vol. in-16, avec 85 fig. .... 3 fr. 50

GRAFFIGNY (H. DE). **La navigation aérienne** et les ballons dirigeables. 1 vol. in-16, avec 43 fig. .... 3 fr. 50

HAMONVILLE (d'). **La Vie des oiseaux**. Scènes d'après nature. 1 vol. in-16 de 400 p., avec 17 pl. .... 3 fr. 50

HOUSSAY. **Les industries des animaux**, par F. HOUSSAY, maître de conférences à l'École normale supérieure. 1 vol. in-16 de 312 p., avec 38 fig. .... 3 fr. 50

KNAB (M.). **Les Minéraux utiles et l'exploitation des mines.** 1 vol. in-16, de 392 p. avec fig. .... 3 fr. 50

LEFÈVRE. **La photographie**, ses applications aux sciences, aux arts et à l'industrie. 1 vol. in-16, avec 90 figures. .... 3 fr. 50

LOCARD (A.). **Les huîtres et les mollusques comestibles** Histoire naturelle, culture industrielle, hygiène alimentaire. 1 vol. in-16 de 350 pages, avec 97 fig. .... 3 fr. 50

TROUESSART. **La géographie zoologique**. 1 vol. in-16 de 350 p., avec 63 fig. et 2 cartes. .... 3 fr. 50

VUILLEMIN (P.). **La Biologie végétale**, par P. VUILLEMIN, professeur à la Faculté de Nancy. 1 vol. in-16 de 380 p., avec 82 fig. .... 3 fr. 50

Tours — Imprimerie DESLIS FRÈRES

HYGIÈNE

L'hygiène à Paris, l'habitation du pauvre, par le Dr O. du Mesnil. 1 vol. in-16........................... 3 fr. 50
Hygiène de l'alimentation, par le Dr Paul Chéron. 1 vol. in-16, avec figures.............................. 3 fr. 50
Les exercices du corps, par E. Couvreur. 1 v. in-16. 3 fr. 50
Le surmenage intellectuel et les exercices physiques, par le Dr A. Riant. 1 vol. in-16 de 320 pages...... 3 fr. 50
L'hygiène à l'école, pédagogie scientifique, par le Dr A. Collineau. 1 vol. in-16, avec 50 figures............. 3 fr. 50.
La vie du soldat, par le Dr Ravenez, médecin de l'école de Saumur. 1 vol. in-16 de 320 pages, avec 40 figures. 3 fr. 50
Nervosisme et névroses. Hygiène des énervés et des névropathes, par le Dr Cullerre. 1 vol. in-16........... 3 fr. 50
Les nouvelles institutions de bienfaisance, par le Dr A. Foville. 1 vol. in-16, avec 10 pl................. 3 fr. 50
L'alcoolisme, moyens de modérer les ravages de l'ivrognerie, par le Dr Bergeret. 1 vol. in-16.................. 3 fr. 50
Le cuivre et le plomb, dans l'alimentation et l'industrie, par A. Gautier (de l'Institut). 1 vol. in-16......... 3 fr. 50
L'examen de la vision, par le Dr Barthélemy. 1 vol. in-16, avec fig. et pl. col.............................. 3 fr. 50
Hygiène de l'esprit. Physiologie et hygiène des hommes livrés aux travaux intellectuels, par les Drs J.-H. Réveillé-Parise et Ed. Carrière. 1 vol. in-16........................ 3 fr. 50
Hygiène des gens du monde, par Al. Donné, inspecteur général des Écoles de médecine. 2e *édition*. 1 vol. in-16 3 fr. 50
Hygiène des orateurs, hommes politiques, magistrats, avocats, prédicateurs, professeurs, artistes, par le Dr Riant. 1 vol. in-16.. 3 fr. 50
Hygiène de la vue, par les Drs Galezowski et Kopff. 1 vol. in-16, avec fig....................................... 3 fr. 50

MÉDECINE

L'eau et les maladies par P. Brouardel, doyen de la Faculté de Paris, 1 vol. in-16............................ 3 fr. 50
Le secret médical, par P. Brouardel, 1 vol. in-16. 3 fr. 50
La folie à Paris, par Paul Garnier. 1 vol. in-16... 3 fr. 50
Les frontières de la folie, par le Dr Cullerre. 1 vol. in-16 de 360 pages...................................... 3 fr. 50
Les irresponsables devant la justice, par le Dr A. Riant. 1 vol, in-16.. 3 fr. 50
Microbes et maladies, par le Dr J. Schmidt, agrégé à la Faculté de Nancy. 1 vol. in-16, avec 24 figures....... 3 fr. 50
La folie chez les enfants, par le Dr Paul Moreau (de Tours). 1 vol. in-16.. 3 fr. 50
La goutte et les rhumatismes, par les Drs J.-H. Réveillé-Parise et Ed. Carrière. 1 vol. in-16.............. 3 fr. 50
Les pansements modernes, par le Dr Alph. Guérin. 1 vol. in-16 de 392 pages, avec fig......................... 3 fr. 50

BIBLIOTHÈQUE DES CONNAISSANCES UTILES

4 FR. NOUVELLE COLLECTION DE VOLUMES IN-18 **4 FR.**

COMPRENANT 400 PAGES, ILLUSTRÉS DE FIGURES ET CARTONNÉS

La Bibliothèque des connaissances utiles a pour but de vulgariser les notions usuelles que fournit la science, et les applications sans cesse plus nombreuses qui en découlent pour les arts, l'industrie, l'économie rurale et l'économie domestique.

Son cadre comprend donc l'universalité des sciences, en tant qu'elles présentent une utilité pratique, au point de vue soit du bien-être, soit de la santé. C'est ainsi qu'elle abordera les sujets les plus variés : *industrie manufacturière, art de l'ingénieur, chimie pratique, agriculture, horticulture, médecine populaire, hygiène usuelle*, etc.

Ceux qui voudront bien recourir à cette *Bibliothèque* recueilleront nombre de renseignements pratiques, d'une utilité générale et d'une application journalière.

ARTS ET MÉTIERS

INDUSTRIE MANUFACTURIÈRE, ART DE L'INGENIEUR CHIMIE, ÉLECTRICITÉ

La fabrication des liqueurs et des conserves, par DE BREVANS, chimiste au Laboratoire municipal. 1 vol. in-18, avec fig. Cart.. 4 fr.

La soie, au point de vue scientifique et industriel, par L. VIGNON. 1 vol. in-18 de 370 p., avec 81 fig. Cart...... 4 fr.

Histoire des parfums et hygiène de la toilette, par S. PIESSE. 1 vol. in-18 de 372 p., avec 70 fig. Cart... 4 fr.

Chimie des parfums et fabrication des savons, par S. PIESSE. 1 vol. in-18 de 360 p., avec 80 fig. Cart...... 4 fr.

Les matières colorantes et la chimie de la teinture, par C.-L. TASSART, 1 vol. in-18, avec fig. Cart............ 4 fr.

L'industrie de la teinture, par C.-L. TASSART. 1 vol. in-18 de 320 p., avec 55 fig. Cart................................ 4 fr.

Les industries d'amateurs, le papier et la toile, — la terre, la cire, le verre et la porcelaine, — le bois, — les métaux, par H. DE GRAFFIGNY. 1 vol. in-18, avec 395 fig. Cart..... 4 fr.

Les secrets de la science et de l'industrie, recettes formules et procédés d'une utilité générale et d'une application journalière, par le professeur A. HÉRAUD. 1 vol. in-18, avec 163 fig. Cart.................................... 4 fr.

X **L'électricité à la maison**, par Julien LEFÈVRE. 1 vol. in-18, avec 209 fig. Cart..................................... 4 fr.

L'art de l'essayeur, par A. RICHE, directeur des essais à la Monnaie de Paris. 1 vol. in-18, avec 94 fig. Cart...... 4 fr.

Monnaie, médailles et bijoux, essai et contrôle des ouvrages d'or et d'argent, par A. RICHE. 1 vol. in-18, avec 200 fig. Cart.. 4 fr.

ENVOI FRANCO CONTRE UN MANDAT POSTE

ÉCONOMIE RURALE

AGRICULTURE, HORTICULTURE, ÉLEVAGE

Le petit jardin, par D. Bois, aide-naturaliste au Muséum. 1 vol. in-18 jésus de 350 p., avec 150 fig. Cart..... 4 fr.
Les arbres fruitiers, par G. Bellair. 1 vol. in-18 de 360 p., avec 100 fig. Cart.................................. 4 fr.
Les maladies de la vigne et les meilleurs cépages français et américains, par Jules Bel 1 vol. in-18 jésus, 350 p., avec 100 fig. Cart.......................... 4 fr.
L'amateur d'insectes, par L. Montillot. 1 vol. in-18 de 350 p., avec 150 fig. Cart.......................... 4 fr.
Les insectes nuisibles, par L. Montillot. 1 vol. in-18, avec fig. Cart.. 4 fr.
Constructions agricoles et architecture rurale, par J. Buchard. 1 vol. in-18, avec 143 fig. Cart......... 4 fr.
Le matériel agricole, par Buchard, 1 vol. in-18. Cart. 4 fr.
La pisciculture en eaux douces, par A. Gobin, professeur d'agriculture. 1 vol. in-18. avec 100 fig. Cart.......... 4 fr.
La pisciculture en eaux salées, par A. Gobin. 1 vol in-18, avec fig. cart.. 4 fr.
L'industrie laitière, le lait, le beurre et le fromage, par Ferville, chimiste agronome. 1 v. in-18, avec 87 fig. Cart. 4 fr.
Guide pratique de l'élevage du cheval, par L. Relier. 1 vol. in-18 de 382 p., avec 128 fig. Cart........... 4 fr.
Les animaux de la ferme, par E. Guyot. 1 vol. in-18, avec 180 fig. Cart.. 4 fr.
Les engrais, par A. Larbaletrier. 1 vol. in-18. Cart.. 4 fr.

ÉCONOMIE DOMESTIQUE

HYGIÈNE ET MÉDECINE USUELLES

Les secrets de l'économie domestique, par le professeur A. Héraud. 1 vol. in-18, avec 281 fig. Cart............ 4 fr.
Les secrets de l'alimentation, par le professeur A. Héraud. 1 vol. in-18, avec fig. Cart.................... 4 fr
Nouvelle médecine des familles, à la ville et à la campagne, par le Dr A.-C. de Saint-Vincent. *Neuvième édition*. 1 vol. in-18, avec 142 fig. Cart....................... 4 fr.
La gymnastique et les exercices physiques, par les Drs Leblond et Bouvier. 1 vol. in-18, avec 80 fig. Cart. 4 fr.
Physiologie et hygiène des écoles, par J.-C. Dalton. 1 vol. in-18 jésus, avec 68 fig. Cart................. 4 fr.
Conseils aux mères sur la manière d'élever les enfants, par le Dr A. Donné. *Septième édition*. 1 vol. in-18. Cart... 4 fr.
Premiers secours en cas d'accidents et d'indispositions subites, par E. Ferrand et A. Delpech. *Quatrième édition*. 1 vol. in-18, avec fig. Cart.................. 4 fr.
La pratique de l'homéopathie simplifiée, par A. Espanet. *Troisième édition*. 1 vol in-18. Cart........... 4 fr.

